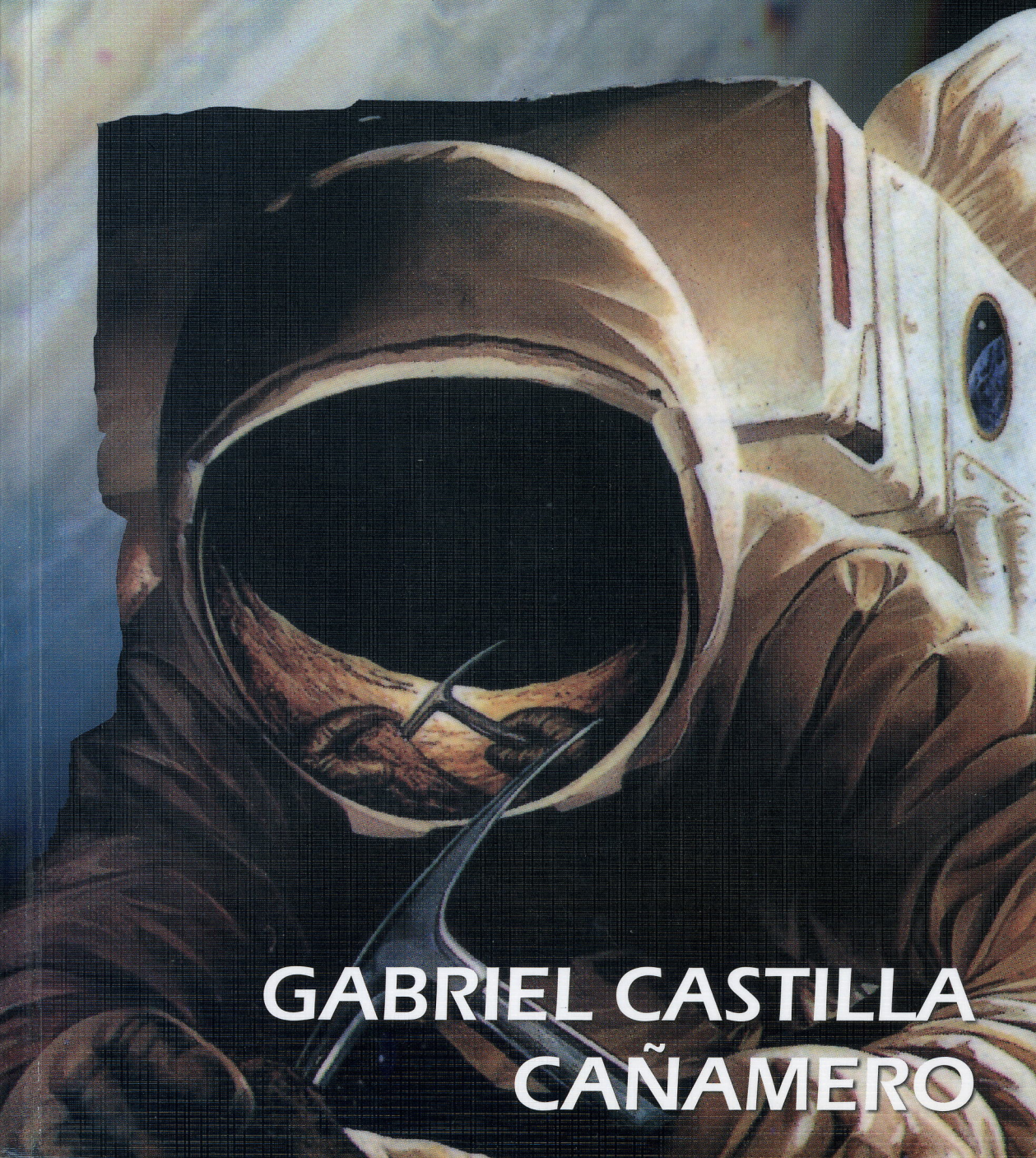


# EL RUMOR DE LOS PLANETAS



GABRIEL CASTILLA  
CAÑAMERO



# **EL RUMOR DE LOS PLANETAS**

UNA GUÍA PARA EXPLORADORES  
DE LA FRONTERA ESPACIAL

**GABRIEL CASTILLA CAÑAMERO**



Diseño de cubierta: *Rolando Potts*

Diseño interior y maquetación: *Óscar Fernández*

Edición al cuidado de : *Gema Gracia*

© EQUIPO SIRIUS 2007

© Gabriel Castilla Cañamero 2007

ISBN-10: 84-95495-68-6

ISBN-13: 978-84-95495-68-6

D.L.: M-39882-2006

Imprime: Lettergraf

Impreso en España / Printed in Spain







A Manuel y Cari.  
Vuestro recuerdo permanece en mi corazón,  
triste por el miedo al olvido

*Senza fine, senza fine,  
tu per me sei luna e stelle,  
tu per me sei sole e cielo,  
tu per me sei tutto quanto  
tutto quanto voglio avere...*

*Gino Paoli*







# ÍNDICE

<b>Prólogo .....</b>	<b>11</b>
<b>Apuntes y Agradecimientos.....</b>	<b>15</b>
<b>I. Somnium .....</b>	<b>21</b>
1. El patio de Karlova.....	23
2. Machina mundi.....	33
3. Revolución .....	45
4. Magia.....	53
5. Visionarios de la frontera .....	61
6. Serendipia.....	69
7. Vacaciones en Roma.....	75
<b>II. De Harmonice.....</b>	<b>101</b>
8. A la deriva .....	103
9. Meteoritos en el desierto .....	115
10. Quizá mañana.....	121
11. Aprender a mirar.....	127
12. Minería espacial .....	141
<b>III. Mystorium.....</b>	<b>151</b>
13. Introducción a la Geofisiología.....	153
14. La Luna y el clima.....	157
15. Un mar de rocas .....	169
16. Océanos de metal .....	181
17. Hielo I .....	189
18. Forma y armonía .....	193
19. Hacia la heliosfera.....	197

<b>IV. Sidereus .....</b>	<b>203</b>
20. La roca del Génesis .....	205
21. Un cometa diferente .....	221
22. Eternamente jóvenes .....	229
23. En el infierno .....	243
24. Mundos desvelados .....	259
25. Todo lo exótico .....	275
<b>V. Epítome .....</b>	<b>285</b>
26. Evolución .....	287
27. Geodiversidad .....	297
28. Taxonomía a la medida .....	305
29. Todos los planetas .....	315
<b>VI. Epílogo .....</b>	<b>321</b>
30. Apología de la frontera .....	323
<b>VII. Bibliografía .....</b>	<b>329</b>



## PRÓLOGO

Unos días antes de empezar la redacción de este prólogo, la NASA lanzó la nave *New Horizons* (Nuevos Horizontes) hacia Plutón. Aparte del interés científico que toda misión de exploración espacial comporta, *New Horizons* está cargada de valor simbólico, tanto, que presiones externas a la agencia espacial norteamericana (incluso desde el Congreso de los Estados Unidos, algo totalmente inusual, ya que éste es uno de los más duros obstáculos al programa espacial de la NASA), forzaron su realización. Más que de un experimento científico, en este caso se trata de un viaje a las fronteras planetarias del Sistema Solar. La condición de planeta de Plutón ha sido cuestionada en los últimos años, debido fundamentalmente a su pequeño tamaño. En efecto, ya se ha descubierto un objeto mayor que Plutón en el llamado Cinturón de Kuiper, y podrían existir muchos más. Pero el que se considere, o no, a Plutón como un planeta no es en realidad importante, ya que la destacada posición en la historia de la ciencia de este objeto astronómico justifica por sí misma su exploración científica.

La exploración planetaria es una de las últimas aventuras románticas de la humanidad. El libro que tengo el privilegio de prologar narra exóticos viajes a las lunas y anillos de los planetas gigantes, al ambiente sofocante y aplastante de las llanuras de Venus, a la bulliciosa superficie de los cometas, o a las ardientes arenas del desierto del Sahara. El Rumor de los Planetas nos habla de héroes legendarios, como Copérnico, Kepler o Galileo, que contribuyeron a sentar las bases sobre las que Newton describió el funcionamiento del mundo, o como las naves gemelas *Voyager 1* y *2*, que continúan su periplo en busca del medio interestelar. Esta obra ofrece una variada perspectiva de diversos aspectos de esta aventura, de su desarrollo como rama de la ciencia, de sus resultados más novedosos, o de los conceptos básicos necesarios para la comprensión del Sistema Solar y los cuerpos que lo componen.

Mientras que es muy frecuente que las obras de divulgación se extiendan en los temas a *priori* más espectaculares (como por ejemplo la búsqueda de vida en otros planetas, especialmente Marte), las páginas que siguen prestan

atención a cuestiones menos habitualmente tratadas, aunque no por ello menos importantes, como pueden ser la naturaleza de los cuerpos menores o de la heliopausa, o las leyes físicas que controlan la forma de los cuerpos planetarios, y nos regalan un paseo «astronómico» por las calles y edificios de Roma; o nos explican cómo la interacción de la Tierra con su entorno cósmico cercano tiene su manifestación más dramática en los enormes impactos asteroidales, los cuales han producido extinciones en masa, en las que una parte importante de la vida del planeta fue arrasada, pero también gigantescos yacimientos de metales que suponen un aporte sustancial para el abastecimiento de la humanidad. Asimismo, el autor reflexiona sobre el futuro de la exploración espacial, su oportunidad y su sentido, discusión especialmente relevante en un momento en que los Estados Unidos se plantean cambiar la dirección de su programa espacial para llevar seres humanos a la superficie de Marte.

En definitiva, nos encontramos ante un libro con sabor romántico pero riguroso, diverso pero interrelacionado, que estoy seguro que hará disfrutar a los lectores como lo he disfrutado yo. En cuanto al autor, Gabriel Castilla, geólogo de formación e investigador en enseñanza de las ciencias de la Tierra y de la Astronomía, es un auténtico enamorado de la divulgación científica, no sólo a través de publicaciones, sino también por medio de talleres y otras actividades en contacto directo con las personas. Esta pasión por transmitir, y por los temas abordados, se refleja en sus artículos y, por supuesto, en este libro, así como en su concepto de divulgación.

En este punto creo que es necesario subrayar el papel imprescindible que la divulgación científica debería tener en la formación cultural de las personas, y en la concienciación de la importancia de la ciencia, sobretudo en un momento en que las asignaturas y carreras de ciencias se están quedando sin alumnos en institutos y facultades, respectivamente. Aunque este no es el lugar adecuado para analizar las razones de este creciente abandono de las ciencias, es evidente que una buena labor divulgadora ayudaría a combatirlo. Lamentablemente, las exigencias académicas e investigadoras de los científicos que trabajan activamente en un determinado campo limitan mucho sus posibilidades de hacer divulgación. En efecto, ésta es una labor mucho más difícil de realizar que escribir textos científicos especializados (dado que requiere un esfuerzo adicional al ser destinada a lectores que no tienen conocimientos técnicos sobre el tema), y que, consiguientemente, requiere mucho tiempo, que no siempre puede emplearse como consecuencia de las obligaciones que impone obtener proyectos financiados, e incluso puestos de trabajo de investigación, máxime cuando a las publicaciones divulgativas apenas se les concede valor en las evaluaciones de la producción científica.

12 Peor aún, escribir divulgación está mal visto por algunos especialistas, afor-

tunadamente cada vez menos, aunque esto no es fácilmente reconocido fuera de determinados círculos.

Por tanto, para finalizar quiero aprovechar esta ocasión para agradecer a Gabriel su esfuerzo por intentar acercar al público las ciencias planetarias y el estudio del Sistema Solar. Sin duda este libro contribuirá a aumentar el interés de muchas personas por la Ciencia, al mostrarla como algo interesante, muchas veces sorprendente, atractivo, o simplemente agradable de leer.

Madrid, febrero de 2006.

*Javier Ruiz,  
Departamento de Geodinámica,  
Universidad Complutense de Madrid.*





## APUNTES Y AGRADECIMIENTOS

Este libro es la constatación de que la exploración planetaria es uno de los temas científicos que mayor interés y curiosidad despierta en la sociedad. En febrero de 2002 la prestigiosa revista *Tribuna de Astronomía y Universo* acogió entre sus páginas la primera entrega de una sección de divulgación científica dedicada a la popularización de las ciencias planetarias. La historia de este libro es la historia de cómo a lo largo de estos años se han ido gestando los artículos que, mes a mes, han aparecido publicados en la sección *Apuntes de Planetología*.

La idea de crear una colección de apuntes sobre planetas se remonta a la primavera del año 2000, cuando comencé a colaborar con el profesor Francisco Anguita en un proyecto educativo relacionado con la asignatura de Planetología (hoy Geología Planetaria) que desde 1989 imparte en la Universidad Complutense de Madrid. Aquel proyecto, al que bautizamos con el provocador nombre de *Profesor, ¿me deja sus apuntes?*, tenía como principal objetivo crear una página Web con esquemas, ejercicios, exámenes y referencias bibliográficas que permitieran a los alumnos preparar las clases con antelación, potenciando así que éstas fueran lo más dinámicas y participativas posibles. Como resultado de aquel proyecto una ingente colección de artículos, anotaciones y borradores sobre los más diversos temas planetarios se fueron apoderando de mi escritorio.

A lo largo del año 2001 me decidí a ordenar buena parte de aquel material con motivo de otros tres proyectos educativos en los que tuve la oportunidad de embarcarme. El primero fue el diseño y puesta en marcha de un taller de enriquecimiento extracurricular sobre Ciencias Planetarias para niños y niñas con Necesidades Educativas Especiales. La Asociación Española de Superdotación y Altas Capacidades (A.E.S.A.C) dio cobijo a aquel proyecto y desde entonces me une a ella un estrecho vínculo afectivo. Me siento muy afortunado por haber podido compartir con Teresa Medina, José Antonio Montes y Serafina García momentos y experiencias realmente maravillosas.

El segundo proyecto que contribuyó decisivamente al nacimiento de estos *apuntes*, fue la creación y desarrollo de una secuencia didáctica sobre Geología Planetaria para los alumnos y alumnas de 2º de Bachillerato del I.E.S. María Zambrano de Leganés. Durante tres años tuve el privilegio de trabajar junto a tres magníficos profesionales del mundo de la docencia y la investigación didáctica: Concha López, Luis Martín y Miguel Ángel de Pablo. Aquellos intensos momentos de creatividad y duro trabajo desembocaron finalmente en una experiencia educativa pionera en nuestro país, merecedora, en la primavera de 2005, del Primer Premio de Innovación Docente de la Universidad Carlos III de Madrid.

La última de las tres aventuras, aunque no por ello la menos importante, fue la edición de un libro de divulgación científica en cuya elaboración participaron amigos y compañeros del Seminario de Ciencias Planetarias de la Universidad Complutense de Madrid, y que fue editado por Equipo Sirius en la primavera de 2003 con el título de *Crónicas del Sistema Solar*. El grato recuerdo que aún conservo de aquella mi primera andanza editorial, y a la magnífica acogida que ha tenido entre los lectores, me han llevado a concebir esta obra.

Los dos primeros apuntes-artículos sobre Planetología nacieron en noviembre de 2001 con el fin de organizar coherentemente la marabunta de anárquicas anotaciones que aquellos tres proyectos empezaban a generar. Los primeros borradores no recibieron malas críticas por parte de los amigos y compañeros a quienes confié su lectura, lo que me llevó a pensar que tal vez podrían llegar a convertirse en un par de artículos de divulgación. Un mes después de redactarlos decidí ponerme en contacto con Alfonso López Borgoñoz, por entonces redactor jefe de *Tribuna de Astronomía y Universo*, y con quien ya había colaborado en diversas ocasiones durante su etapa al frente de la entrañable revista *Universo*. Recuerdo que una tarde de mediados de diciembre le envié un correo electrónico con aquellos primeros borradores y una breve carta donde, además de explicarle cómo se habían gestado, le preguntaba abiertamente si creía que aquello era o no digno de ser publicado. Un par de horas después recibí su contundente respuesta: «Gabriel, ya puedes ir organizando los papeles». Ante la inesperada oportunidad que me brindaba de colaborar habitualmente con *Tribuna*, decidí aprovechar al máximo el interludio navideño y me lancé a confeccionar una lista de posibles artículos y a escribir varios borradores más. Finalmente, en la víspera del Año Nuevo se hizo firme la propuesta de crear la primera sección sobre Ciencias Planetarias para una de las revistas de divulgación de mayor solera en nuestro país. Y como una oportunidad de ese calibre no se presenta todos los días, acepté sin dudar. Gracias Alfonso por aquella oportunidad.

Nunca creí que ponerle nombre a una sección de divulgación científica fuera una tarea tan compleja. Durante varios días nos dedicamos a buscar palabras que, además de contar con cierto gancho (llamémoslo comercial), fueran un fiel reflejo de los contenidos que deseaba presentar mes a mes a los lectores. Se barajaron títulos como Planetología (a secas), Geología Planetaria y Geoplanetología. Curiosamente, y por alguna razón que desconozco, la primera entrega (un artículo dedicado a Japeto, satélite de Saturno) fue publicado bajo este último epígrafe. La decisión final fue bastante meditada y se tomó por dos razones: primera, porque el término *apuntes* recordaba la filosofía y circunstancias en que habían sido gestado aquellos dos primeros artículos; y segunda, porque el nombre *planetología* hace referencia al estudio de todos los cuerpos planetarios del universo al margen de su naturaleza y ubicación; mientras que el prefijo *geo* previsiblemente restringiría la temática de la sección a aspectos estrictamente relacionados con la Geología. Puesto que mi intención era escribir sobre anillos, atmósferas, cometas, dinámicas orbitales e historia de la exploración, era evidente que la sección necesitaba un nombre que permitiera dar cabida a los más diversos temas.

En alguna ocasión me han preguntado cuáles son los criterios que sigo a la hora de redactar un artículo. La respuesta es sencilla: para escribir sobre un tema necesito sentirme cómodo con él, es decir, debe gustarme lo suficiente como para poder dominarlo y ser capaz de sintetizarlo en poco más de 6.000 caracteres y dos o tres figuras, pues ese es todo el espacio del que normalmente dispongo. Además, debo tenerlo terminado antes del día uno del mes anterior a su publicación. Y lo más importante de todo: sólo escribo por el placer que me supone hacerlo.

Toda forma de expresión humana, ya sea ésta un cuadro, una melodía o una ecuación, comienza siempre con la búsqueda de una forma visual capaz de traducir del modo más claro posible un determinado pensamiento. Sin embargo, sólo unas pocas mentes privilegiadas son capaces de alcanzar y plasmar mediante un simple lápiz esa forma visual ideal que contemplan con su mente. El común de los mortales, después de una larga serie de intentos, nos vemos más o menos resignados a convivir con la imperfección; confiando, eso sí, en aprender a limar las asperezas de nuestras obras con la ayuda de la experiencia que otorga una continua reflexión sobre la práctica. Mes a mes, y con desigual fortuna, he pretendido despertar entre los lectores cierta inquietud por descubrir los tesoros que esconde nuestra vecindad cósmica. Para lograrlo he recurrido a los más de diez años que llevo invertidos en esto de pensar y leer sobre planetas. Pero difícilmente habría sido capaz de plasmar mis pensamientos de forma ordenada y coherente sin la ayuda de Miryam, fiel compañera de aventuras, musa incondicional y paciente correctora.



Los lectores afortunados y atentos detectarán que le debo algún reconocimiento a Johannes Kepler, por apropiarme del nombre de algunas de sus obras para dar título a los principales apartados de este libro. No he podido resistir la tentación de homenajear así al científico que, junto a Santiago Ramón y Cajal, más ha influido (y aún influye) en la formación de mi espíritu científico.

Espero no desconcertar a nadie si menciono una vez más a Miguel Ángel de Pablo, geólogo, investigador planetario, amigo y compañero de andanzas educativas. El leyó y corrigió pacientemente tanto el primer manuscrito de este libro como los primeros artículos-apuntes que escribí a finales de 2001.

Por su extraordinaria calidad humana, compañerismo y buen hacer, no puedo dejar de expresar mi gratitud a Ricardo Lara, Angélica Torices, Jaime Cuevas, Raúl Montesinos, Javier Elez, Juan Antonio Cárdbaba, Nohemí Sala, Carol Sala, Omid Fesharaki y Nieves López. Los mágicos momentos que he tenido el privilegio de compartir con vosotros en el marco del *Proyecto Somosaguas de Paleontología Social* son parte del combustible que hace posible este viaje.

Mención especial en este apartado de agradecimientos merece Javier Ruiz, uno de los investigadores planetarios de nuestro país con mayor prestigio y proyección internacional. Me siento en deuda con él porque, además de aceptar escribir el prólogo de este pastiche espacial, sus acertadas sugerencias, correcciones y comentarios sirvieron para mejorar notablemente la calidad de la obra en su conjunto. Amigo y compañero de viaje en más de una aventura, sus trabajos de investigación son para mí un referente de honestidad científica.

Este libro no sería lo mismo sin la colaboración de todas las instituciones, museos, universidades, bibliotecas, centros de investigación y personas que aparecen en los créditos de las imágenes. En especial quiero mostrar mi agradecimiento a Francisco Anguita, Ferrán Claudín, Kord Ernstson y Manuel Cabedo por facilitarme la mayor parte de las imágenes del capítulo dedicado a las evidencias de impacto en la Península Ibérica. Al *United States Geological Survey* (USGS), a la *European Space Agency* (ESA), al *Jet Propulsion Laboratory* (JPL) y a la *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), por las tremendas facilidades con que nos ofrece a los interesados todo tipo de documentación y fotografías.

En enero de 2004 la vieja *Tribuna* cambió su nombre por el de *Astronomía*. Pero el nombre es lo de menos. Ninguno de los artículos que conforman la colección que presento en este libro habría visto la luz de no ser por el brillante trabajo realizado por su equipo de redacción: Carlos Soto, responsable de gestión comercial; Rolando Potts encargado del diseño y la maquetación;

Alfonso López Borgoñoz, coordinador científico; Jorge Ruiz Morales, director y editor de casi todo lo que escribo; y Ángel Gómez Roldán, paciente redactor jefe y cómplice en este viaje por la frontera espacial. Me siento en deuda con todos ellos por la magnífica y casi heroica labor que vienen realizando mes a mes desde hace más de veinte años. Va por vosotros.

Gabriel Castilla Cañamero  
Madrid, diciembre de 2006



# I. SOMNIUM

*«La idea de que la ciencia puede y debe actuar de acuerdo con reglas fijas y universales es tan poco realista como perniciosa. Es poco realista porque tiene una visión demasiado simple de los talentos del hombre y de las circunstancias que fomentan o provocan su desarrollo. Y es perniciosa porque el intento de aplicar las leyes está abocado a incrementar nuestra cualificación profesional a expensas de nuestra humanidad. Además, la idea es perjudicial a la ciencia, porque pasa por alto las complejas condiciones físicas e históricas que influyen en el cambio científico. Hace que la ciencia sea menos adaptable y más dogmática».*

**Paul K. Feyerabend**  
Contra el Método, 1975



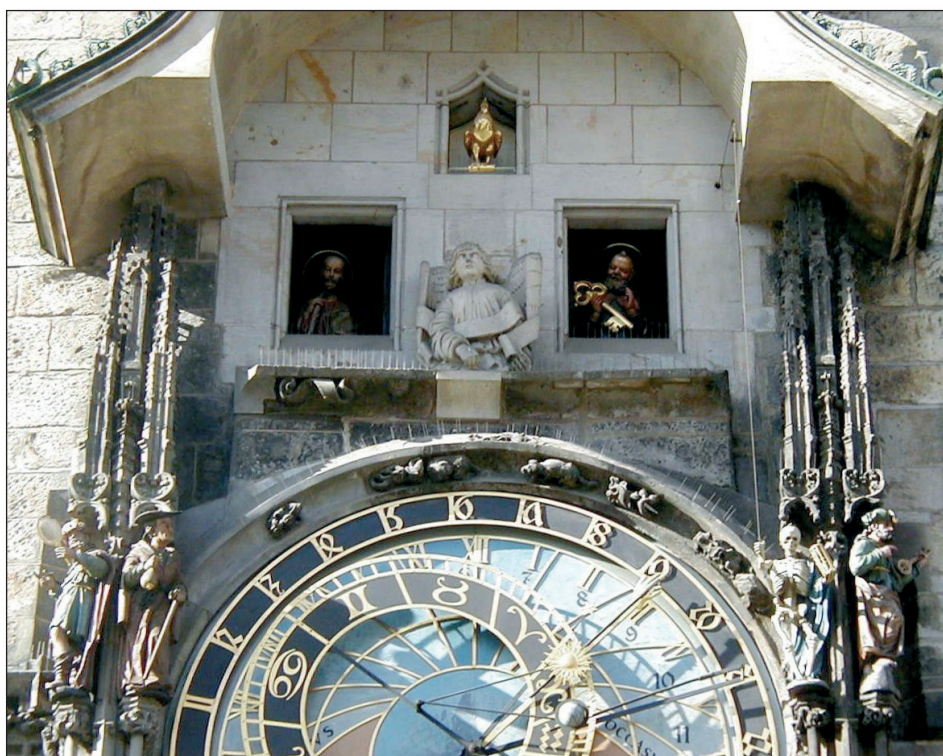


# 1. EL PATIO DE KARLOVA

Entre los años 1600 y 1612 el matemático Johannes Kepler vivió en Praga bajo la protección del emperador Rodolfo II de Habsburgo. Esta ciudad, entonces capital del Sacro Imperio Romano Germánico, fue escenario de un momento clave en la historia de la ciencia: en ella se forjaron las leyes que describen los movimientos planetarios. Cuatro siglos después aún perduran en sus calles los ecos de aquel tiempo, un raro tesoro histórico que parece estar condenado al olvido.

El centro histórico de Praga pasa por ser uno de los conjuntos arquitectónicos más bellos de Europa. Durante todo el año sus calles, plazas y museos se ven asaltadas por hordas organizadas de turistas que se afanan en buscar las huellas dejadas por personajes de la talla de Franz Kafka o Wolfgang Amadeus Mozart. Sin embargo, uno de los lugares históricamente más emblemáticos de la ciudad es sistemáticamente ignorado por casi todos sus visitantes. La estéril compartimentación del conocimiento en dos culturas, ciencias y humanidades, propicia que muchos turistas recorran esta ciudad sin saber que en otro tiempo fue escenario de uno de los momentos más importantes de la Revolución Científica. Sólo unos pocos románticos se afanan en buscar un pequeño patio amarillo que se esconde en la calle Karlova, cerca del Puente de Carlos. Sólo ellos conocen esta historia...

A finales del siglo XVI Rodolfo II de Habsburgo, rey de Bohemia y Hungría y emperador del Sacro Imperio Romano Germánico, huyendo de las luchas religiosas de Viena, trasladó a Praga la capital del Imperio. En aquella época esta ciudad era un laberinto de estrechas y retorcidas calles donde, según los viajeros y mercaderes que la frecuentaban, *«el hedor era lo suficientemente fuerte como para hacer retroceder a los turcos»*. A pesar de la falta de higiene, y las incomodidades propias de una ciudad medieval (de la que hoy quedan ya pocos vestigios), en pocos años Praga se transformó en uno de los referentes científicos y culturales de Occidente. En ella Rodolfo II dio cobijo a una nutrida corte de artistas, matemáticos, astrólogos y alquimistas entre los que se contaban Jost Burgi, uno de



*Figura 1.1. Construido en 1414 por el relojero Mikuláš di Kadan y el astrónomo Jan Sindel, el espectacular reloj astronómico del ayuntamiento de Praga recuerda a quienes lo visitan que esta ciudad fue un importante foco científico y cultural en la Europa del Renacimiento. Ampliado en los siglos XV y XVII, además del paso de las horas, marca el santoral, los signos del zodiaco y las estaciones del año. Cada hora en punto es señalada por el movimiento de unos pequeños autómatas que representan a los apóstoles.*

los padres de los logaritmos; Erasmus Habermel, creador de un sextante que permitía realizar observaciones astronómicas con una precisión de dos minutos de arco; y el pintor italiano Giuseppe Arcimboldo, conocido en toda Europa por sus retratos compuestos con figuras de animales y plantas.

Por consejo del matemático y alquimista Tadeas Hájek, Rodolfo II también invitó al noble danés Tycho Brahe, el mejor y más famoso astrónomo de su época. Por desavenencias personales<sup>1</sup> con el rey Christian IV de Dinamarca, Tycho había abandonado Uraniborg, el fabuloso observatorio astronómico que se había hecho construir en la isla danesa de Hveen (Figura 1.2); y se encontraba vagabundeando por diferentes cortes europeas haciéndose acompañar por familiares, sirvientes, cortesanas, instrumentos astronómicos, biblioteca, bufones

<sup>1</sup>. Durante sus últimos años de estancia en Hveen, la arrogancia de Tycho rozaba la megalomanía. El gran hombre que había sido la gloria de Dinamarca se convirtió en un personaje que causaba el más profundo desagrado en todo el país.

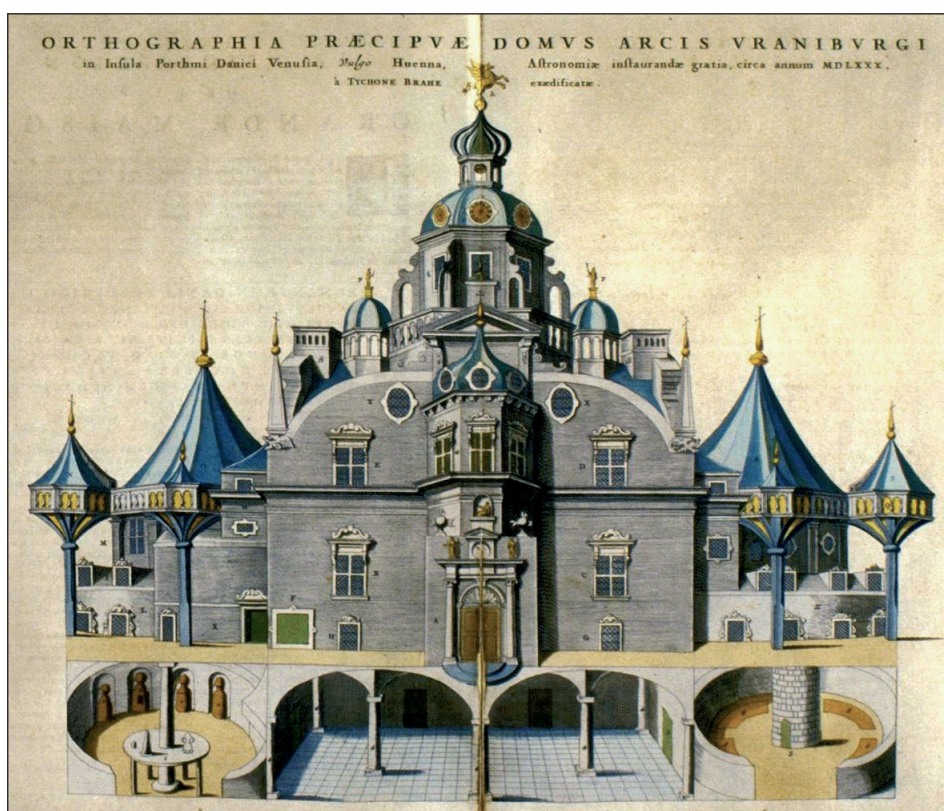


Figura 1.2. El Observatorio de Uraniborg (literalmente castillo de las estrellas) según un dibujo de la obra de Willem Janszoon Bleu, *Cosmographiae Blaviane*, Ámsterdam, 1667.

y una nutrida colección de animales de compañía. El peculiar cortejo llegó a Praga en junio de 1599, e inmediatamente Rodolfo nombró a Tycho Matemático Imperial. Durante un tiempo pudo reanudar sus observaciones desde la terraza del Belvedere (Figura 1.3), un palacio de verano de estilo renacentista estratégicamente situado a pocos metros del castillo del emperador. En su nueva residencia Tycho era *víctima* de las continuas visitas del excéntrico Rodolfo, distracción ineludible que le impedía reanudar sus sistemáticas observaciones. Finalmente, en un intento desesperado por huir de las distracciones de la corte, se trasladó al castillo de Benatky, a unos treinta kilómetros al norte de Praga, con la intención de construir allí un segundo Uraniborg.

El más preciado tesoro de Tycho, el único bien del que nunca se separaba, era un viejo cuaderno donde durante cerca de veinte años anotó meticulosamente todas las observaciones astronómicas realizadas desde Hveen. En base a ellas logró confeccionar el mapa del firmamento más exacto de su época, una carta estelar que comprendía un millar de estrellas fijas además de unas tablas





*Figura 1.3. Palacio de Belvedere, construido por el arquitecto Paolo della Stella en los jardines del castillo de Praga. En este lugar intentó reanudar Tycho sus observaciones astronómicas en el verano de 1599. Las continuas visitas del emperador Rodolfo II le animaron a cambiar esta residencia por el castillo de Benatky.*

con las posiciones exactas que los planetas, entonces conocidos, habían ido ocupado a lo largo de aquellos años respecto al, en apariencia inmutable, fondo estrellado de la bóveda celeste. Los registros astronómicos de Tycho eran los únicos con los que se podían realizar cálculos precisos y obtener resultados sin ambigüedades sobre la verdadera forma de las órbitas de los planetas. Aquella información estaba llamada a jugar un papel decisivo en la controversia que desde 1543, año de la publicación del *De revolutionibus orbium coelestium* de Copérnico, mantenía dividida a la intelectualidad europea en dos bandos: geocentristas ptolemaicos y heliocentristas copernicanos. Tycho sabía que en aquellas anotaciones residía la clave para comprender la verdadera forma del universo, pero no tenía quien le hiciera el *trabajo sucio* de acometer la difícil tarea de transformar los números en un modelo coherente y sin fisuras.

Cuando Tycho llegó a Benatky llevaba casi tres años manteniendo correspondencia con un prometedor profesor de matemáticas del seminario protestante de la ciudad de Gratz llamado Johannes Kepler. En la primavera de 1597 éste había editado y enviado ejemplares de su primera obra, *Mysterium Cosmographicum*, a numerosos intelectuales europeos, entre los que se contaban Galileo, Tycho y William Gilbert, naturalista inglés autor del primer tratado sobre el magnetismo terrestre. En una época en la que aún no existían revistas científicas, había, sin embargo, un intenso intercambio de correspondencia entre los hombres de ciencia. A finales del siglo XVI el pensamiento y los pensadores de toda Europa estaban divididos en dos posturas casi irreconciliables: los medievalistas de ideas neoplatónicas y los espíritus modernos de mente

empírica. La aceptación de la primera obra de Kepler fue bastante desigual por ambas partes.

A pesar de la entusiasta y lúcida defensa que Kepler realizó de la obra de Copérnico, (de hecho su *Mysterium* constituye el primer reconocimiento público de sus ideas escrito por un astrónomo profesional), Galileo y otros empiristas mostraron sus prejuicios contra una obra *a priori* especulativa en la que se defendían abiertamente ideas místicas de corte pitagórico. Aunque Tycho era un hombre de mentalidad medieval, también rechazó de plano las especulaciones del profesor de matemáticas, pero supo ver en ellas el talento de su autor. Sabedor de que necesitaba a un joven matemático con el suficiente talento como para dar sentido a sus anotaciones, pero lo suficientemente desconocido como para evitar que le robara cualquier ápice de protagonismo histórico o mérito científico entre sus contemporáneos, no dudó en alimentar durante dos años su relación epistolar con Kepler. Una vez se hubo instalado en Benatky, le invitó a reunirse con él.

La excéntrica personalidad de Rodolfo II y las guerras de religión que asolaban Europa conspiraron para favorecer el encuentro de estos dos titanes de la ciencia. Afortunadamente para ellos, y para la historia de la Astronomía, el contacto personal entre ambos apenas se prolongó durante unos pocos meses, pues nada más conocerse estallaron las desavenencias. La convivencia era imposible, no se soportaban. Las excentricidades de uno<sup>2</sup> chocaban frontalmente contra el inestable carácter del otro. La situación se agravó cuando Tycho tuvo que renunciar a los esplendores de Benatky porque el emperador, hombre terriblemente supersticioso e inseguro, requería continuamente sus servicios como astrólogo personal. Los dos genios (nunca mejor dicho) se trasladaron entonces a una casa en Praga, donde tuvieron que ocupar unas habitaciones bajo el mismo techo... Y si en un castillo lo fácil es ignorarse, en una casa pequeña lo difícil es evitar los roces de la convivencia (Figura 1.4).

Tycho murió inesperadamente el 24 de octubre de 1601 después de una terrible agonía. Durante una fiesta celebrada el 13 de octubre abusó de la bebida y retuvo la orina hasta que su vejiga reventó<sup>3</sup>. El 2 de noviembre fue enterrado

---

2. Tycho era excéntrico hasta en su apariencia física: no todo el mundo posee una nariz de plata y oro. Cuentan que cuando era un joven estudiante se enfrentó en duelo a otro noble danés, en el transcurso del cual parte de su nariz resultó rebanada. Según los historiadores, la pelea se originó a causa de una disputa sobre quién de los dos nobles daneses era mejor matemático. La parte perdida fue reemplazada por una aleación de oro y plata. Al parecer siempre llevaba consigo una pequeña caja que contenía un ungüento con el que frecuentemente se frotaba la nariz.

3. Kepler registró meticulosamente lo ocurrido en el diario de la casa de los Brahe: «El 13 de octubre, Tycho Brahe, en compañía del maestro Minkowitz, acudió a cenar en casa del ilustre barón Rosenberg, y retuvo sus aguas más allá de lo que exige la cortesía. Al beber más, sintió que la tensión de su vejiga se incrementaba, pero puso la educación por delante de su salud. Cuando regresó a casa, apenas fue capaz de orinar»



Figura 1.4. Estatuas de Tycho Brahe (izquierda) y Johannes Kepler (a un simbólico paso por delante de aquel) en la plaza Keplerova, en el corazón del barrio de Hradcany, cerca del castillo de Praga. En esta misma plaza se levantaba la casa donde ambos astrónomos se vieron obligados a convivir en 1601.



con gran pompa y homenaje en la iglesia de Nuestra Señora de Thýn, en la plaza vieja del ayuntamiento de Praga (Figura 1.5). Su ataúd fue escoltado por doce caballeros imperiales precedidos por su escudo de armas, sus espuelas de oro y su caballo favorito. Aún hoy, más de cuatro siglos después, el eco de las últimas palabras que pronunció en su lecho de muerte, resuenan en las páginas de los libros de historia: *«Que no parezca que he vivido en vano»*.

Ante la fundada sospecha de que los cuadernos de anotaciones se perderían para siempre tras la muerte de Tycho (con toda seguridad sus legítimos herederos los deshojarían y venderían por partes al mejor postor), Kepler aprovechó la confusión reinante durante los primeros días de luto para, según sus propias palabras, *«tomar bajo mi cuidado»* el legado intelectual del astrónomo danés. Cuatro días después del entierro, el consejero privado del emperador decidió nombrar a Kepler sucesor en el puesto de Matemático Imperial, cargo que conservaría incluso después de la muerte de Rodolfo en 1612.

Los doce años que pasó Kepler en Praga fueron, según sus propias palabras, *«la etapa más feliz y productiva de mi vida»*. En ese tiempo estableció los cimientos de dos nuevas disciplinas científicas: la óptica instrumental y la astronomía física. Durante seis de aquellos años se entregó al difícil cálculo de la órbita de Marte, con diferencia el más complejo de cuantos movimientos



*Figura 1.5. Iglesia de Nuestra Señora de Týn, en la Plaza Vieja de Praga (izquierda). En su interior se encuentra la lápida de Tycho Brahe (debajo).*





Figura 1.6. Placa en la fachada del número 4 de la calle Karlova que recuerda que aquí vivió Kepler entre los años 1607 y 1612.

planetarios había registrado Tycho durante años. Esta tediosa tarea finalmente quedó plasmada en su obra *Astronomía Nova* (el título completo es bastante más largo y descriptivo: *Nueva Astronomía basada en la causalidad o Física Celeste derivada de las investigaciones de los movimientos de la estrella Marte fundada en las observaciones del noble Tycho Brahe*), que salió de la imprenta en 1609. Este libro supuso un duro golpe contra el geocentrismo, pues en él presentó las dos primeras leyes de los movimientos planetarios, es decir, la primera descripción completa y precisa del movimiento de los planetas. Kepler afirma sin reparos que las órbitas de los planetas tienen forma de elipse, y que en su traslación alrededor del Sol estos astros cubren áreas iguales en tiempos iguales. El cosmos griego comenzaba a desquebrajarse.

Pero, si los planetas se desplazan por el espacio, ¿qué fuerza los impulsa a moverse alrededor del Sol? Kepler encontró una respuesta con la que casi acarició el concepto newtoniano de gravedad. Inspirándose en la obra *De Magnete* (1600), del inglés William Gilbert, afirmó que «si dos piedras se encuentran situadas en un lugar cualquiera del espacio, la una cerca de la otra y fuera del alcance de la fuerza de un tercer cuerpo, entonces se unirán entre sí, a la manera



*de los cuerpos magnéticos, en un punto intermedio, cada una aproximándose a la otra en proporción a la masa de esta última».* Así pues, no sólo Tycho no había vivido en vano, sino que Newton ya disponía de unos hombros a los que subirse para poder ver más lejos.

Kepler, hombre intelectualmente inquieto y trabajador infatigable, compaginó el cálculo de la órbita de Marte con otros trabajos, entre ellos la composición del primer tratado moderno sobre óptica: *Dioptrice* (1610), donde recoge algunos de los fundamentos teóricos del telescopio incluso antes de tener noticia de la construcción de uno. De hecho, este trabajo serviría posteriormente para respaldar las primeras observaciones astronómicas realizadas por Galileo desde Padua y Venecia con un pequeño telescopio refractor de veinte aumentos. Intercambió con él una breve correspondencia desde Praga, una extensa carta que aparecería publicada en el opúsculo *Sidereus Nuncius* (1610).

Johanes Kepler fue el primero en proponer que las leyes físicas cuantitativas válidas en la Tierra sostienen también las leyes físicas que gobiernan los



*Figura 1.7. Monumento erigido en el patio de la que fuera casa de Kepler en Praga, hoy el número 4 de la calle Karlova, cerca del Puente de Carlos.*

cielos, explicación que convirtió a la Tierra en una provincia más del universo. Vislumbró la verdadera *Armonía de los Mundos* con la única ayuda del lenguaje de la razón y su voluntad. En el número 4 de la calle Karlova se esconde un pequeño patio amarillo donde hoy casi nadie detiene sus pasos. Una placa en la puerta y un pequeño monumento en su interior nos recuerdan que allí vivió y trabajó Kepler, el hombre que puso el Sistema Solar al alcance de la humanidad.

## 2. MACHINA MUNDI

Durante siglos la evolución tecnológica del telescopio condicionó el ritmo en la exploración del Sistema Solar. A pesar del papel protagonista que este instrumento óptico ha desempeñado desde la Revolución Científica, los historiadores de la ciencia carecen de los datos necesarios que les permitan determinar, sin ambigüedades, quién inventó la máquina que puso el cielo al alcance de la humanidad.

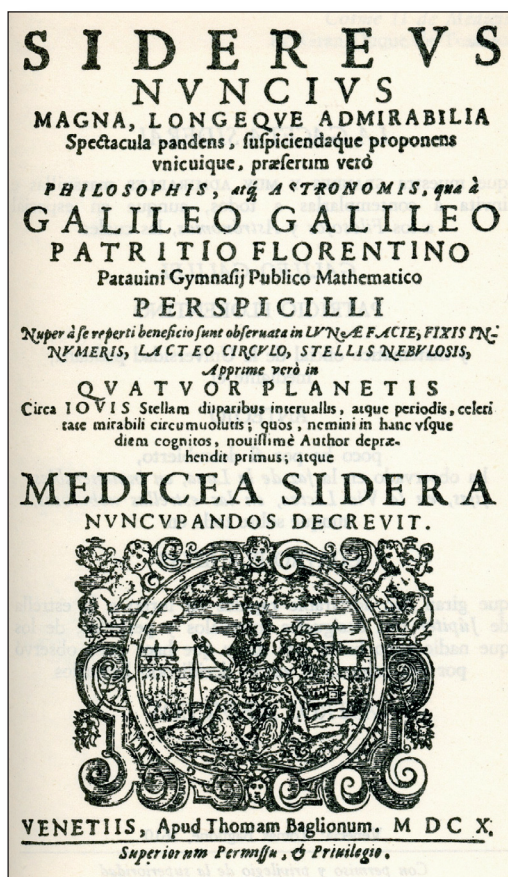
En 1609 Galileo rebasó los límites físicos de la Tierra con la ayuda de un simple tubo de latón y dos lentes de vidrio. Con un sencillo instrumento óptico de fabricación artesanal, Galileo tuvo el privilegio de ser el primer ser humano en contemplar de cerca la orografía lunar, las fases de Venus, los anillos de Saturno y las máculas del Sol. Este hito científico y tecnológico provocó tanto asombro entre sus contemporáneos que incluso equivocadamente le fue adjudicado el título de inventor del telescopio. Sin embargo, a pesar de la creencia popular, Galileo no fue ni el primero en fabricar un anteojito ni el primero en escrutar el cielo con la ayuda de un instrumento óptico. En el prólogo de su libro *Sidereus Nuncius* (1610), en un histórico y admirable alarde de sinceridad, el autor nos confiesa: «Cerca de diez meses hace que llegó a nuestros oídos la noticia de que cierto holandés había fabricado un anteojito mediante el que los objetos visibles muy alejados del observador se discernían claramente como si se hallaran próximos».

Este popular párrafo ha suscitado durante siglos una pregunta casi obligada: ¿por qué razón Galileo omitió en su libro el nombre del creador del primer telescopio? Para los historiadores la respuesta es evidente: Galileo no podía ponerle nombre y apellido a este «cierto holandés» porque, con toda seguridad, no conocía su identidad. De hecho, hasta finales del siglo XVII la intelectualidad europea barajó los nombres de hasta tres posibles candidatos: Jacob Metius de Alkmaar, Zacarías Jansen y Hans Lipperhey.

Zacarías Jansen (1588-1631) fue un artesano del vidrio que estuvo vinculado con la construcción de los primeros microscopios. Es posible que llegara a construir un anteojito, o quizá incluso lograra mejorar algunos de los diseños



Figura 2.1. Portada de la primera edición de *Siderius Nuncius* (1610). Mediante esta cuidada obra Galileo dio a conocer al mundo los resultados de sus primeras observaciones astronómicas (Comitato per la Divulgazione dell'Astronomia de Firenze)



más primitivos, pero no existen pruebas de que fuera el verdadero padre de la idea. Fueron sus descendientes quienes a mediados del siglo XVII reivindicaron la figura de Jansen como inventor del primer telescopio, aduciendo para ello su supuesto heroico comportamiento ante los ejércitos españoles y el sufrimiento que ello le acarreo... Pruebas que sin duda hacen de Jansen el candidato menos popular entre los historiadores de la ciencia.

Jacob Metius de Alkmaar (?-1628) era un artesano de reconocido prestigio que provenía de una familia de la aristocracia militar holandesa. Al parecer compensó una escasa formación académica con un talento especial para producir vidrio y tallar lentes. Su fama y destreza llevaron a Descartes a mencionarlo en el prólogo de su *Dioptrique* (1637), atribuyéndole el dudoso mérito de haber conseguido, «por fortuna», construir un instrumento para la visión a distancia. En el siglo XVII los Países Bajos eran una importante potencia comercial que contaban con una fuerte organización artesanal e industrial. Esto les llevó a desarrollar un sistema de patentes por medio del cual se permitía registrar inventos, potencialmente rentables, y otorgaban a los adjudicatarios

el privilegio de su explotación comercial durante un tiempo. Sabemos por distintas fuentes que Metius construyó un anteojo y que a finales de 1608 intentó registrar la patente. Sin embargo las autoridades no se lo permitieron, pues al parecer alguien ya se le había adelantado.

Hans Lipperhey (1570-1618) es sin duda el más famoso y firme candidato de los tres (Figura 2.2). El astrónomo, matemático y físico holandés Christian Huygens, interesado en conocer la identidad del artífice del primer instrumento que tanta fama habría de proporcionarle<sup>1</sup>, encontró pruebas documentales que demuestran los derechos de Lipperhey sobre la primera patente. Por una carta fechada el 25 de septiembre de 1608 en La Haya descubrió que Lipperhey reclamó *«tener un cierto instrumento por medio del cual todas las cosas a gran distancia pueden ser vistas como si estuvieran cerca, al mirar a través de vidrios y reclama que es su invención»*. En octubre de ese año le fue concedida una patente a *«Hans Lipperhey, fabricante de gafas, residente en Middeburg»*. A comienzos de siglo XVII las gafas eran artilugios artesanales muy apreciados, y Lipperhey debió experimentar con ellas con el fin no sólo de conseguir una visión suficientemente clara, sino además un tamaño razonable. Su anteojo era un valioso instrumento para la observación terrestre y las autoridades holandesas rápidamente se interesaron por él, pensando, sobre todo, en un potencial uso militar.



Figura 2.2. Retrato del óptico holandés Hans Lipperhey (Oklahoma University).

## PLANES Y CONTROVERSIAS

El gobierno holandés regaló al rey de Francia dos modelos fabricados por el propio Lipperhey; novedades de importación que se hicieron tan populares que ya en la primavera de 1609 podían adquirirse en las tiendas de fabricantes de lentes de París. En el verano de ese mismo año llegaron hasta Inglaterra e

1. Huygens construyó sus propias lentes y telescopios, con los que descubrió el primer satélite de Saturno (Titán, 1655), las estrellas de la nebulosa de Orión (1656), los anillos de Saturno (1659) y las marcas de la superficie de Marte, que le permitieron llegar a la conclusión de que este planeta gira sobre su eje (1659). En una obra póstuma escrita en latín: *Cosmoteoros, sive de Terris coelestibus, earumque ornatu conjecturae* (1698), defiende la pluralidad de los mundos habitados y trata de demostrar que sus habitantes han de tener características muy semejantes a las nuestras.

Italia, donde desembarcaron de manos de comerciantes napolitanos. A primeros de agosto el diplomático Jacob Badouere, amigo y antiguo alumno de Galileo, escribió a su maestro una carta donde le comentaba las excelencias del nuevo instrumento que tan rápidamente se propagaba por Europa.

A Galileo no debió resistírsele demasiado la construcción de su propio antejo, pues sabemos que ya el 21 de agosto, pocos días después de recibir la carta de Badouere, preparó una demostración de su funcionamiento desde el campanario de la catedral de San Marcos de Venecia. A esta demostración invitó a los principales patricios venecianos, y uno de ellos, el procurador Antonio Priuli, describió aquel primer instrumento de Galileo como «*un tubo de hojalata, forrado por el exterior con tejido de lana y algodón rojo carmesí, de longitud aproximada de tres cuartos y medio (unos 60 cm) y anchura de un escudo, con dos vidrios, uno cóncavo y el otro no*». Los ilustres asistentes pudieron comprobar con sus propios ojos lo que anteriormente habían oído por los rumores procedentes de París y los Países Bajos, a saber: que con este tubo se podían ver objetos distantes con tanta claridad como si verdaderamente estuvieran cerca. Tres días después de aquella presentación en sociedad (el tiempo calculado que tarda un rumor en propagarse por todos los rincones de una ciudad) Galileo dio un definitivo golpe de efecto regalando aquel fantástico artilugio a la *Signoria* de Venecia (Figura 2.3).

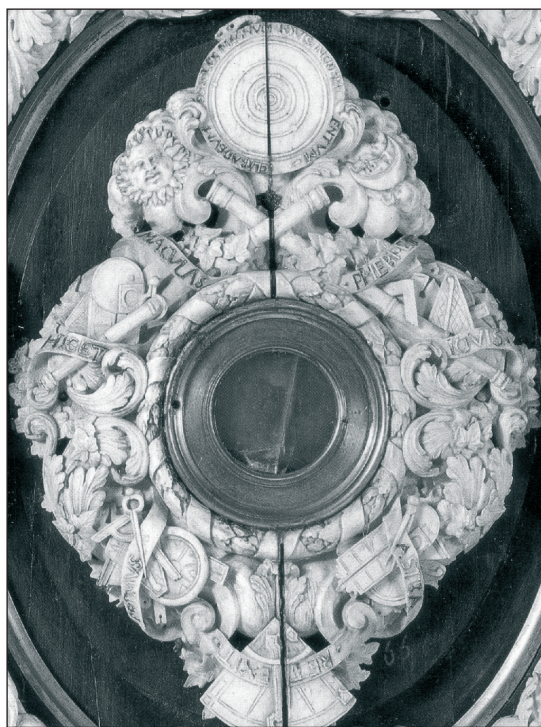


Figura 2.3. La lente del telescopio que Galileo regaló en 1610 al Gran Duque de Toscana Fernando II, se conserva hoy en el Museo de Historia de la Ciencia de Florencia (Museo di Storia della Scienza, Firenze).

La estrategia dio sus frutos y menos de una semana después de aquella cuidada puesta en escena, el Senado de la República de Venecia lo nombró profesor vitalicio en la Universidad de Padua y le duplicó el sueldo. Así fue como de la noche a la mañana Galileo pasó de ser un profesor ordinario de matemáticas con un contrato de seis años y un sueldo bastante humilde, a ostentar una cátedra y ser reconocido socialmente por el gobierno de la Serenísima, y todo gracias a la idea de otro arropada con un viejo tubo de órgano forrado de lana y dos pequeñas lentes. ¿Qué más podía pedir?

Una noche de noviembre de 1609, mientras el físico de Pisa disfruta de las mieles del éxito social, un astrónomo autodidacta de origen alemán llamado Simon Marius (1573-1624) orientaba al cielo por primera vez su rudimentario telescopio, observando, con asombro, que junto a Júpiter había unas pequeñas estrellas que cambiaban de posición con el transcurso de las horas y los días (Figura 2.4). Cinco semanas después, en enero de 1610, Galileo hacía el mismo descubrimiento; pero a diferencia de Marius, él se aplicó en la tarea de registrar meticulosamente las posiciones de aquellos satélites para dárselos a conocer al mundo tan rápidamente como le fuera posible.



Figura 2.4. Retrato del matemático alemán Simon Marius, fechado hacia 1606 (Deutschen Museum).

A pesar de que Marius defendió durante toda su vida que él observó primero los satélites de Júpiter, la mayoría de los libros de historia afirman que los cuatro satélites principales del sistema joviano fueron descubiertos por Galileo Galilei la noche del 7 de enero de 1610 (aunque realmente esa noche sólo eran visibles tres de ellos). Dada la rápida difusión del telescopio, es posible que Marius se adelantara a Galileo y, aunque nunca lo sabremos con certeza, algunos manuales sobre Ciencias Planetarias<sup>2</sup> comienzan a atribuir el descubrimiento simultáneamente a los dos astrónomos.

2. Un buen ejemplo de esto podemos encontrarlo en la obra *The New Solar System*, de Beatty et al. 1999 (página 389).



Galileo decidió llamarlos *Estrellas Mediceas* en honor a su antiguo alumno, y ya entonces mecenas, Cósimo II de Médicis, Gran Duque de Toscana; mientras que el astrónomo alemán, asesorado por Johannes Kepler, entonces Matemático Imperial de la corte de Rodolfo II de Habsburgo, propuso los nombres de cuatro de los amores de Júpiter: Ío, Europa, Ganímedes y Calisto. Al final la historia ha encontrado una solución de compromiso: los hoy popularmente conocidos como satélites *galileanos* reciben los nombres propuestos por Marius.

Pero no sólo la prioridad en el descubrimiento de los satélites de Júpiter fue objeto de controversia. En aquella misma época un extraño personaje inglés rondaba la escena de los descubrimientos astronómicos. Su nombre era Thomas Harriot (1560-1621), y de él se ha dicho que es uno de los mayores científicos *nunca* conocidos (Figura 2.5). En sus cuadernos de anotaciones, inéditos hasta bien entrado el siglo XVIII, los historiadores de la ciencia descubrieron que su curiosidad científica le llevó a realizar importantes hallazgos en el campo de las matemáticas y de la física, aportaciones al mundo de la ciencia que, por razones desconocidas, nunca fueron publicadas ni difundidas. Gracias a la correspondencia que Harriot mantuvo con Kepler sabemos que se sintió profundamente interesado por la óptica; y con toda seguridad disponía ya en la primavera de 1609 de un antejo de seis aumentos, aunque no sabemos si fue comprado o fabricado (quizá incluso inventado) por él. La noche del 26 de julio de 1609 (equivalente al 5 de agosto del calendario gregoriano), observó la superficie de la Luna e hizo un sencillo dibujo de aquella primera experiencia astronómica (Figura 2.6). Esta prueba gráfica demuestra que Harriot se adelantó en cuatro meses a las observaciones de Galileo, pues él mismo nos confiesa en su obra *Sidereus Nuncius* que no dirigió su telescopio hacia la Luna hasta el 30 de noviembre de ese año (Figura 2.7).



Figura 2.5. Thomas Harriot hacia 1602  
(East Carolina University).

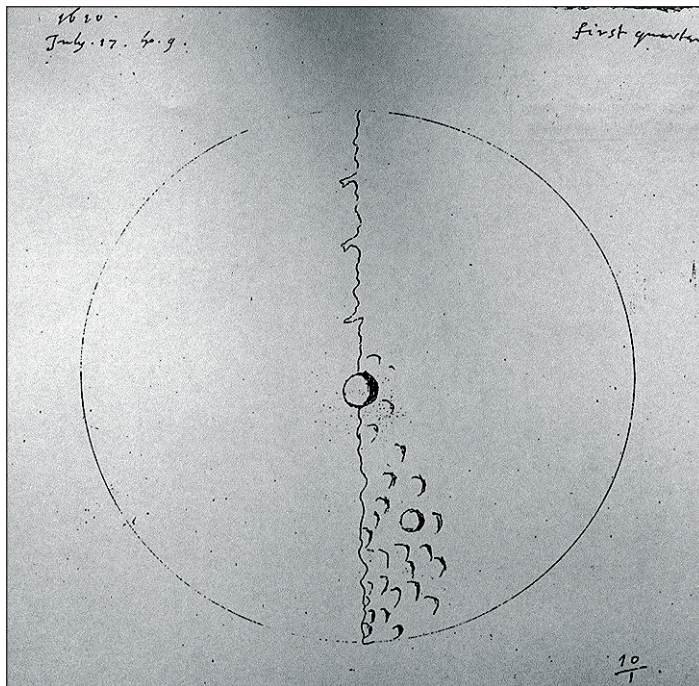
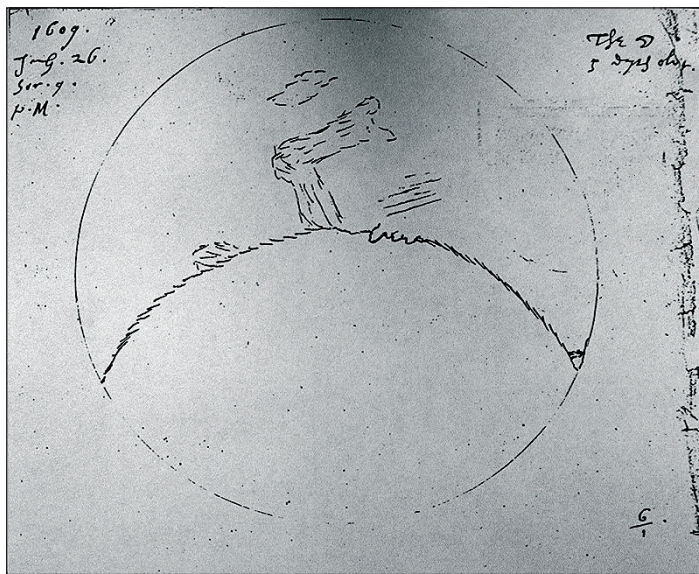


Figura 2.6. Dibujo realizado por Thomas Harriot el 26 de julio de 1609 tras su primera observación de la luna (arriba). En los dibujos de posteriores observaciones, como la realizada el 17 de agosto de 1610 (abajo), se aprecian ya algunos cráteres. Las diferencias entre ambos bocetos puede deberse a la calidad del instrumento empleado en cada caso (Rice University).

## NUEVAS PISTAS HACIA EL PASADO

Cuando a finales de 1608 Jacob Metius intentó patentar un antejo, descubrió que Hans Lipperhey se le había adelantado. Pero Metius no sólo no dudó en reconocer la prioridad de Lipperhey sobre la patente, sino que además fue mucho más lejos y admitió que su antejo estaba inspirado en

Figura 2.7 Dibujos de la Luna realizados por Galileo tras sus primeras observaciones de noviembre de 1609 (Comitato per la Divulgazione dell'Astronomia de Firenze).



un instrumento italiano construido en la década anterior. Este instrumento, del que hoy apenas conocemos testimonios, vendría a demostrar que alguien anterior a los maestros holandeses del vidrio sabía de las propiedades de las lentes para amplificar los objetos.

Ese alguien pudo ser el matemático, naturalista y filósofo Giambattista della Porta (1535-1615), autor del tratado *De magia naturalis* (1589) (Figura 2.8). En el Libro XVIII capítulo 10 de su obra puede leerse: «con la (lente) cóncava ves las cosas lejanas pequeñas y claras, mientras que con la convexa ves las cosas cercanas mayores aunque borrosas. Si supieras combinar ambas correctamente, verías mayores y claras tanto las cosas lejanas como las pequeñas». Obvia decir que cualquier inquieto lector que se topara con este párrafo (quizá Harriot) sólo tuvo que ponerse manos a la obra y probar suerte... Y por si quedara alguna duda de sus intenciones, sólo tenemos que leer el capítulo siguiente, donde dedica todo un apartado a «las lentes con las que cualquiera puede ver a una distancia mayor que todo lo imaginable». Johannes Kepler llegó a decir sobre este texto: «la demostración de cómo hacerlo (ver a gran distancia) está tan embrollada que no hay manera de saber lo que quiere decir: si sigue hablando como antes de lentes transparentes o si, por el contrario, introduce un espejo opaco pulimentado».

«Un espejo opaco pulimentado»... ¿Es posible que Porta estuviera describiendo un telescopio de reflexión un siglo antes de que Newton lo inventara? Difícil saberlo. En cualquier caso, hoy los historiadores sospechan que incluso antes que Porta hubo otro genio interesado en las propiedades de la reflexión aplicadas a la Astronomía.



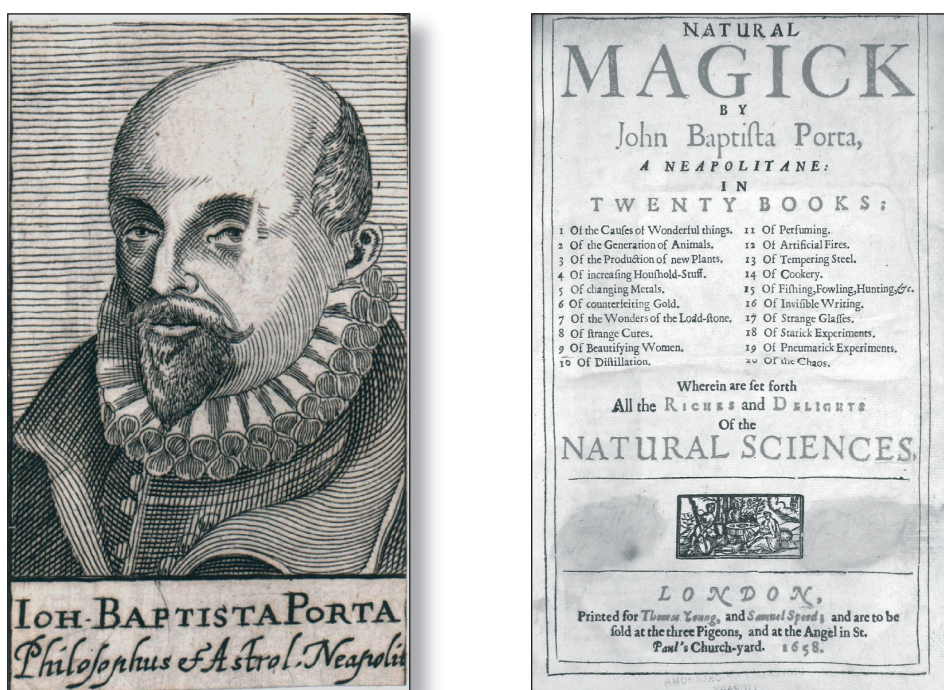


Figura 2.8. Retrato de de Giambattista della Porta (izquierda) y portada (derecha) de una edición inglesa de su libro *De magia naturalis* (1589), (Dibner Library of the Story of Science y Oklahoma University).

## LEONARDO Y LA ASTRONOMÍA

Leonardo Da Vinci no fue astrónomo, pero sí un apasionado de la Naturaleza en su conjunto. Fue el primer occidental en reconocer que la cenicienta luz de la Luna es reflejo de la de la Tierra (Figura 2.9); y analizando el halo difuso que rodea a las estrellas descubrió el carácter subjetivo de sus dimensiones observables. Siguiendo la línea de pensamiento de Nicolás de Cusa, abandonó la imagen cosmológica geocéntrica de sus contemporáneos y abrazó una concepción heliocéntrica del universo. Acorde con esta línea de pensamiento son algunas de sus notas recogidas en el manuscrito *F* del Instituto de Francia, donde se puede leer: «*La Tierra no está en el centro del círculo del Sol ni en el centro del mundo*».

Leonardo también se ocupó de estudiar los tamaños del Sol y de la Luna, la naturaleza de los eclipses, la temperatura del Sol e incluso la posible rotación de la Tierra, un problema de gran envergadura si tenemos en cuenta que en el siglo XV se daba por cierto que el ciclo día-noche era debido a la rotación universal en torno a la Tierra, entonces considerada el centro del cosmos. Hacia 1506 llegó a diseñar un anteojo que poseía todos los elementos de un

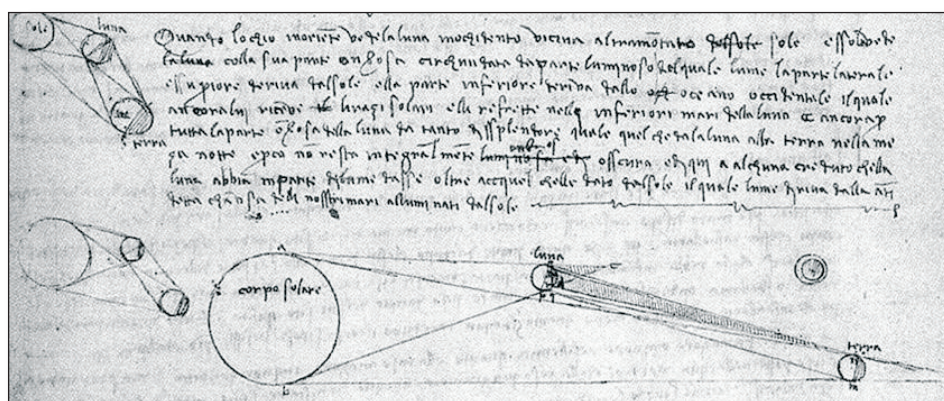


Figura 2.9. Apuntes de Leonardo sobre astronomía con explicaciones acerca de la luz cenicienta de la Luna nueva. Códice Hammer o Leicester (hacia 1508), actualmente propiedad de Bill Gates (Edición Nacional Vaticana, Giunti).

telescopio refractor: un tubo con una lente convexa y otra cóncava en el lado opuesto. Con un instrumento como el que describe en su *Códice F* sólo pudo alcanzar un par de aumentos, apenas un juguete.

Pero ni Leonardo fue el primero en construir un artefacto como este, ni el primero en orientarlo al cielo. Aunque es posible que chinos y árabes conocieran ya las propiedades de estos rudimentarios instrumentos, el caso más famoso de todos es el del naturalista británico del siglo XIII Roger Bacon (1212-1292), convencido empirista<sup>3</sup> que realizó interesantes experimentos de óptica con lentes y espejos. Llegó a describir fenómenos como la reflexión, la refracción, la aberración esférica y se interesó por el uso de gafas para corregir los defectos de la visión. Cuentan que Bacon llegó a construir un pequeño antejo con el que observó el cielo, pero que al no apreciar ningún detalle significativo, perdió todo interés.

La verdadera pasión por el telescopio alcanzó a Leonardo casi al final de su vida, coincidiendo con los tres años que permaneció en Roma (de 1513 a 1516) bajo la protección del Papa León X y Giuliano de Médicis. Para los historiadores esta es una época muy oscura en la vida del artista, de la que apenas se conocen algunos detalles. Sabemos que durante este tiempo se dedicó plenamente a la ciencia y que se instaló en los jardines del palacio Belvedere del Vaticano, donde disponía de un taller de espejos con varios operarios a su

3. El empirismo es la corriente filosófica que defiende que el conocimiento se origina desde la experiencia. Según palabras de Francis Bacon (1561-1626), máximo representante del pensamiento renacentista de Inglaterra, y padre del empirismo moderno: «El hombre, servidor e intérprete de la naturaleza, ni obra ni comprende más que en proporción de sus descubrimientos experimentales y racionales sobre las leyes de esta naturaleza; fuera de ahí, nada sabe ni nada puede» (*Novum Organum*, Libro I,1).



servicio. Pero, ¿qué se traía el viejo genio entre manos? En el *Códice Arundul* de la British Library (1513) el polifacético inventor deja entrever algunas de sus intenciones: «*construir una máquina con el objetivo de observar la naturaleza de los planetas, abrir el tejado y atrapar la imagen de un planeta en la base de un espejo cóncavo. La imagen reflejada por la base mostrará la superficie del planeta más aumentada*».

Partiendo de este texto, el historiador Doménico Argentieri rastreó en los cuadernos del artista las fases del posible invento, llegando a la controvertida conclusión de que Leonardo soñaba con la construcción de un telescopio reflector de grandes dimensiones. Para conseguir aumentos notables estimaba que necesitaba espejos de gran tamaño, por lo que aplicó su ingenio en la construcción de máquinas capaces de hacerlo: en el *códice Atlántico* de la Biblioteca Ambrosiana de Milán (1478-1480) se pueden ver los bocetos de una máquina capaz de pulir espejos cóncavos de hasta 6 metros de diámetro (Figura 2.10).

Parece que Leonardo lo tenía todo pensado, pero su sueño (uno de tantos) no se cumplió, y es por ello que no podemos atribuir a Leonardo la invención del telescopio. Sin embargo, tampoco podemos ignorar el admirable esfuerzo que realizó por querer ser el primer hombre en contemplar de cerca el universo.

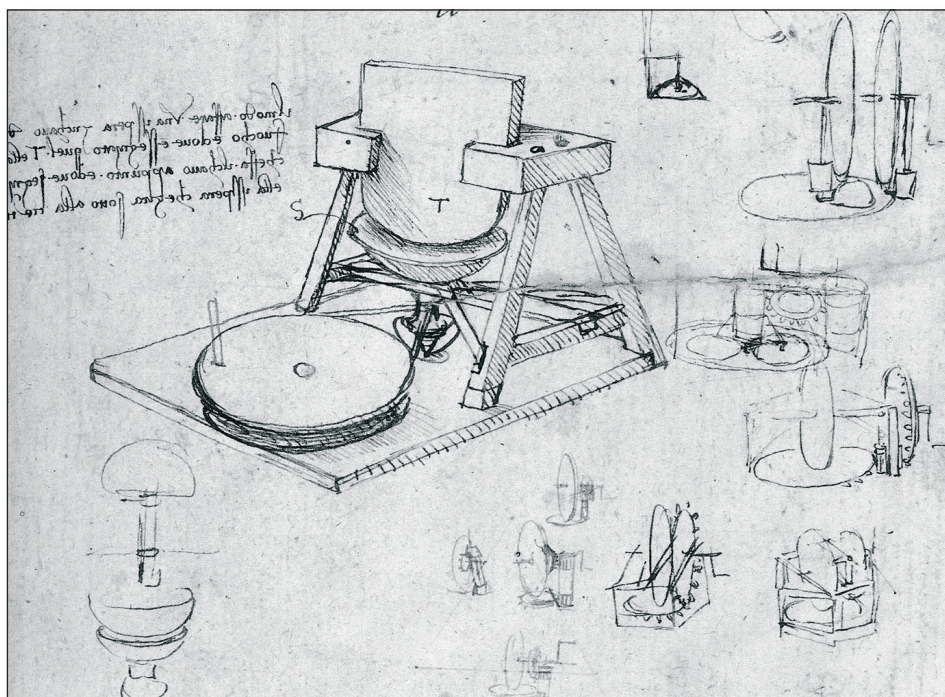


Figura 2.10. Bocetos de algunas de las máquinas ideadas por Leonardo Da Vinci para pulir espejos de gran tamaño. *Códice Aurundel*, fechado hacia 1478-1480 (British Library).

Si Galileo sorprendió al mundo con un anteojo de apenas 20 aumentos, ¿qué habría sucedido si Leonardo hubiera logrado construir su *machina mundi* un siglo antes? La respuesta es sin duda un magnífico argumento para una novela de historia-ficción.

## ALGUNAS CONCLUSIONES

Aunque no sabemos quién fue el primero que pulió varios tipos de lentes, sí sabemos que fueron introducidas por vez primera en Europa: en algún momento del siglo XIII. Sin embargo, el primer telescopio no apareció hasta cerca de 1590. Y aquí es donde surge la gran pregunta: ¿por qué se tardaron tres siglos enteros en poner una lente frente a otra? La mayoría de los historiadores consideran hoy que la invención del telescopio responde a la confluencia de una serie de factores y coincidencias únicas: a una floreciente industria del vidrio en Italia y los Países Bajos, potencias comerciales ávidas de nuevos mercados y productos, se le unió la publicación de los primeros trabajos sobre óptica teórica por parte de Porta, Harriot y Kepler; innovaciones, libros e ideas que se difundieron a gran velocidad entre la intelectualidad y los artesanos europeos. El invento era tan sencillo (un simple problema de combinación de lentes) y estaba tan en el ambiente, que muy posiblemente varios fueron los artesanos que simultáneamente, y en varios estados (Italia, Países Bajos y posiblemente Inglaterra), construyeron los primeros anteojos para la observación marítima y terrestre. Igualmente, varios fueron los espíritus inquietos que, con apenas unos meses de diferencia, decidieron orientar aquel instrumento al cielo. Así pues, los datos históricos nos permiten afirmar que el primer telescopio fue, parafraseando a Demócrito, fruto del azar y la necesidad.

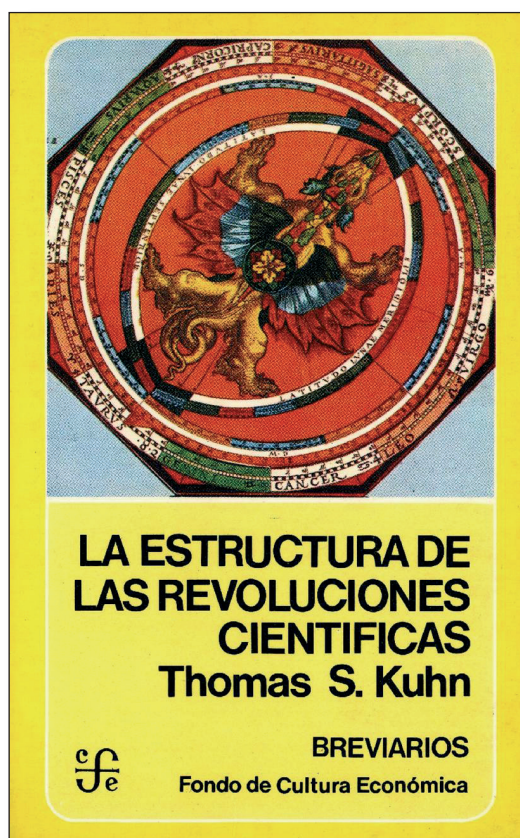
### 3. REVOLUCIÓN

«Al principio creó Dios los cielos y la tierra». Con esta frase la Biblia formula la más conocida de las hipótesis cosmogónicas occidentales. A mediados del siglo XVIII el naturalista y pensador francés George-Luis Leclerc, conde de Buffon, se atrevió a desafiar la imagen ideal del Génesis bíblico con las armas de la ciencia y la razón. Sin embargo, a pesar de su ingente labor como pensador, científico y divulgador, Buffon es hoy un perfecto desconocido para la mayoría de los estudiantes de ciencias de nuestro país.

En la década de los setenta las revolucionarias ideas del físico y epistemólogo<sup>1</sup> Thomas Kuhn comenzaron a calar entre los investigadores de todo el mundo. Sus seguidores popularizaron el término *paradigma* para referirse a la ciencia «normal», es decir, al conjunto de los supuestos teóricos generales que adoptan y comparten los miembros de una determinada comunidad científica. Por sólido que pueda parecernos el edificio del conocimiento que aprendemos de los libros de texto cuando somos estudiantes, es bastante frecuente que esta ciencia «normal» o dominante, experimente dificultades en su intento por explicar algunos aspectos del mundo real. Según Kuhn, si estas dificultades se les escapan de las manos a la comunidad de investigadores, se genera entonces un estado de crisis que sólo quedará resuelto cuando un paradigma completamente nuevo, pero capaz de resolver estos problemas, se gane la adhesión de un número de científicos cada vez mayor. De esta forma el paradigma original, acosado por dificultades (fallos en las predicciones, ambigüedad en los resultados o exceso de suposiciones para explicar un determinado fenómeno), será abandonado por los investigadores de la comunidad científica en beneficio de otro nuevo. Este cambio constituye lo que desde hace medio siglo se conoce como Revolución Científica, y tras ella, el nuevo paradigma lleno de promesas y posibilidades, guiará entonces la actividad científica normal, es decir, la ortodoxa. Cabe esperar que con el tiempo este paradigma se vea acosado por

1. Entendiendo el término epistemología como teoría de la fundamentación del conocimiento científico, un epistemólogo es aquel que investiga sobre el conocimiento.

*Figura 3.1. Portada de La Estructura de las Revoluciones Científicas, de Thomas Kuhn (1962), uno de los ensayos que más influencia ha ejercido sobre el pensamiento filosófico y la concepción del progreso científico en las últimas cuatro décadas. (Fondo de Cultura Económica, 1982)*



otros problemas que desencadenarán una nueva crisis, y entonces una nueva revolución se pondrá en marcha.

Muchos historiadores y filósofos consideran que más o menos así es como se desencadenan los grandes progresos en cualquier campo de la ciencia. Pero, ¿qué sucede entonces con las motivaciones, las ilusiones, las controversias y los protagonistas de la generación de investigadores precedente? La respuesta es sencilla: poco a poco se diluyen en la memoria hasta ser completamente olvidados. Quizá algún erudito los recuerde en algún ensayo destinado a satisfacer la curiosidad de un minúsculo grupo de expertos en el tema; pero más allá de este grupúsculo de especialistas, nadie más los recordará. Como tan acertadamente afirmó el escritor francés Robert Brasillach: «la historia la escriben los vencedores».

Por parte de la comunidad científica existe un continuo y necesario proceso de criba y selección en el que sólo las ideas «mejor adaptadas» (valga el símil darwiniano) finalmente sobreviven. Tan sólo una pequeña parte de la información que la investigación aporta a la ciencia es incorporada de un modo permanente al cuerpo de conocimiento científico. Pero, dado el volu-



men de información acumulada durante siglos en los archivos científicos, a la hora de trazar las líneas maestras del conocimiento, resulta muy tentador representar la historia de la ciencia como un cuento de éxitos incondicionales en el que un genio iluminado tras otro han recorrido el inevitable sendero del progreso y la «verdad» científica. No hay duda de que podemos aprender mucho estudiando solamente los éxitos, pero esos caminos óptimos son ficciones históricas, a las que se llega sólo porque se ignora un vasto cuerpo de otra materia, que aunque no era menos científica en su tiempo, ya ha sido olvidado (en términos evolutivos, diríamos que se ha extinguido). Quienes practican la ciencia saben que los auténticos antecedentes del desarrollo científico incluyen gran cantidad de experimentos infructuosos y de teorías que luego se han olvidado alegremente. La ciencia es un cúmulo de derrotas y unas cuantas victorias provisionales.

### LA CIENCIA DE LOS VENCEDORES...

No lo duden, la historia de la ciencia también la escriben los vencedores. Si, por ejemplo, nos aventuramos a buscar entre los libros de texto (y pongo este ejemplo porque, aunque no debería ser así, el libro de texto es poco menos que un objeto sagrado para la mayoría de los escolares y docentes de todo el mundo) el apartado dedicado al origen del Sistema Solar, descubriremos que en la mayoría de los casos los antecedentes históricos se centran exclusivamente en dos personajes: el alemán Immanuel Kant y el francés Pierre Simón (marqués) de Laplace. La explicación de este reduccionismo histórico es muy sencilla: ambos son considerados los padres de la teoría nebular, el modelo clásico más parecido a la actualmente aceptada teoría planetesimal, el paradigma dominante. Según ésta, los planetas se formaron por acreción de materia a partir de un disco de gas y polvo que giraba en torno a una incipiente estrella a la que hoy llamamos Sol (Figura 3.2). El primero en publicar sus ideas fue Kant, en un pequeño opúsculo titulado *Historia Natural y Teoría del Cielo* (1755). Cuarenta años después Laplace publicó en su *Exposición del Sistema del Mundo* (1796) una versión mejorada y más detallada de la idea de Kant... Aunque se olvidó (!) por completo de mencionar al filósofo de Königsberg, verdadero padre de la idea.

Si hacemos caso al refranero popular y damos por bueno aquello de *quien calla otorga*, fácilmente podríamos llegar a deducir (y es muy probable que muchos estudiantes y docentes así lo hagan) que la omisión de otros antecedentes históricos en los libros de texto de ciencias se deba a que estos dos pensadores fueron realmente los pioneros en la construcción de un modelo alternativo al creacionista. Así es como inconscientemente aprendemos, transmitimos y perpetuamos la historia de la ciencia escrita por los vencedores.



*Figura 3.2. Los planetas se formaron hace unos 4.500 millones de años por acreción de materia a partir de un disco de gas y polvo que giraba en torno a una incipiente estrella a la que hoy llamamos Sol. En esta reconstrucción artística se aprecia como un embrión planetario emerge del caos del disco nebular. El constante bombardeo de partículas mantiene fundida su superficie a la vez que provoca un lento pero inexorable crecimiento (En Beatty et al., 1999).*

### ... Y DE LOS VENCIDOS

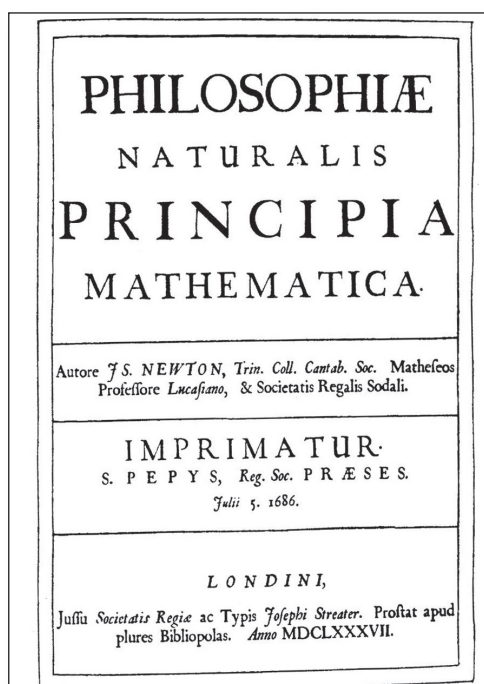
El primero en proponer una cosmogonía independiente del relato bíblico fue René Descartes, quien decidió extrapolar a gran escala procesos cotidianos observados en la naturaleza. Los torbellinos, movimientos circulares que se producen en el aire y en el agua, fueron la principal fuente de inspiración de su particular concepción del universo. Descartes, como los pitagóricos, consideraba estos movimientos circulares como los más naturales por su belleza y armonía. Defendía que el Sol se había formado en el centro de un gigantesco torbellino primario capaz de arrastrar en su curso a los planetas, convertidos a su vez en centro de torbellinos secundarios que hacen girar a los satélites en torno a ellos. Esta doctrina tuvo una amplia difusión en Francia hasta entrado el siglo XVIII. El propio Isaac Newton enseñó esta cosmogonía al comienzo de su carrera como profesor en la Universidad de Cambridge, pero con el tiempo se volvió un gran crítico de la misma pues, aunque la idea era ciertamente sugerente, era consciente de que en el fondo carecía de argumentos físicos y matemáticos que la respaldaran.

Se podría creer que el padre de la mecánica celeste buscaría una base sólida para fundamentar una alternativa racional. Como principal heredero de las contribuciones científicas de Copérnico, Kepler y Galileo, Newton parecía destinado a ser el primero en asignar un origen no divino al admirable orden de los movimientos planetarios. Pero no fue así. El tercer libro de sus *Principia* (1686) lo dedica a describir el Sistema del Mundo, enseñando a calcular con



precisión los movimientos de la Luna, las trayectorias de los cometas y las órbitas de los planetas, pero sin arrojar un solo rayo de luz sobre el origen del sistema que tan meticulosamente describe (Figura 3.3). En el escolio final de esta obra, quizá la más importante de la historia de la ciencia, se limita a declarar:

*«Tan elegante combinación de Sol, planetas y cometas sólo pudo tener origen en la inteligencia y poder de un ente inteligente y poderoso. Y si las estrellas fijas fueran centros de sistemas semejantes, todos ellos contruidos con un esquema similar, estarían sometidos al dominio de un único y mismo ser».*



*Figura 3.3. Portada de los Principia de Newton (1687), una de las obras más importantes de la historia de la ciencia. En ella se describe detalladamente el movimiento de los cuerpos que configuran el Sistema Solar, pero no aborda el problema más interesante de todos: su origen (British Library).*

Con estas contundentes palabras la cosmología bíblica salía prácticamente indemne de la Revolución Científica. La Tierra ya no ocupaba el centro del sistema, pero no había ninguna duda de que el Sol y cuanto le rodea había sido creado por Dios. Incluso el instante de tan magno evento fue deducido con toda precisión por los padres de la iglesia a partir de las cronologías que se recogen en el Antiguo Testamento. El mismo Newton dedicó buena parte de su vida a tan estéril tarea.

Uno de los más famosos intentos de establecer la edad de la Tierra a partir del recuento de la vida de los profetas fue el emprendido por James Ussher, arzobispo de Armagh (Figura 3.4). En su obra *Anales del Antiguo Testamento deducidos del primer origen del mundo* (1650) concluía, sin la más mínima som-



*Figura 3.4. Retrato de James Ussher, arzobispo de Armagh, mediados del siglo XVII (British Library).*

bra de duda, que la Tierra fue creada por Dios el domingo 23 de octubre del año 4.004 antes de Cristo, habiendo comenzado tan formidable tarea durante el ocaso del día precedente. La humanidad habría sido creada el viernes 28 de octubre, y Adán y Eva expulsados del paraíso el lunes 10 de noviembre. Por increíble que hoy nos pueda parecer, hace trescientos años pocos eran los que se atrevían a dudar abiertamente sobre la veracidad de esta sentencia... Aunque más increíble aún es que en pleno siglo XXI, e inmersos en una sociedad tecnológica como la nuestra, las estimaciones de Ussher constituyan una parte importante de las creencias de los colectivos creacionistas que se cuestionan sin pudor los paradigmas científicos evolutivos en que se basan disciplinas como la Astrofísica y la Biología.

Y es en este punto cuando aparece en escena nuestro desconocido protagonista: George-Luis Leclerc, conde de Buffon (Figura 3.5). Estudió Derecho, Medicina y Ciencias Naturales viajando por toda Europa, y fue nombrado miembro de la Royal Society de Londres y de la Academia Francesa de París. En 1745 (una década antes que Kant y más de medio siglo antes que Laplace) se atrevió a proponer una hipótesis cosmogónica conforme a los principios de la física newtoniana, la primera alternativa científica al Génesis bíblico. Admitió que la historia de los planetas pudo comenzar con una catástrofe: la colisión del Sol con otro cuerpo de masa comparable. Según su razonamiento, este violento encuentro debió expulsar de ambos astros una ingente cantidad de materia e imprimió a todo el sistema una cierta rotación. Según este esce-



*Figura 3.5. Sello de la República Francesa con el retrato de George-Luis Leclerc, conde de Buffon.*

nario, algunos de los fragmentos debieron perderse en el espacio mientras que otros, reunidos en globos incandescentes, comenzaron a girar alrededor del Sol formando los planetas.

Esta primera hipótesis de corte científico obligaba por primera vez a plantear una incómoda pregunta: ¿cuánto tiempo transcurrió desde que se formaron los planetas hasta que se enfriaron y adoptaron su aspecto actual? Buffon es el primero en preguntarse de forma racional acerca de la edad de los cuerpos que constituyen el Sistema Solar, y también es el primero en intentar alcanzar de forma empírica una respuesta científicamente válida. Para ello ideó y realizó un ingenioso experimento que básicamente consistía en medir el tiempo que tardaban en enfriarse bolas incandescentes de hierro de diferentes tamaños. Mediante extrapolaciones bastante lógicas concluyó que la Tierra necesitó 75.000 años para enfriarse y alcanzar su actual consistencia, la Luna 16.000 y Júpiter 200.000 años. De la noche a la mañana Buffon multiplicó por dieciocho la edad estimada para la Tierra, hiriendo de muerte al rancio pero orgulloso creacionismo que lastraba el progreso de disciplinas de corte historicista como la Geología.

Hoy sabemos que Buffon estaba equivocado en sus ideas sobre el origen de los planetas; sin embargo fue el primero en barajar un escenario catastrofista que nada tenía que ver con el Sistema Solar de *minué* propuesto por Newton. Fue el primero en desafiar la cosmogonía creacionista con las armas de la razón, abriendo con ello nuevos campos a otras disciplinas científicas. Cuando el debate sobre el origen de los planetas se encontraba en un callejón sin salida a comienzos del siglo XX, sus ideas fueron retomadas e inspiraron a físicos y astrónomos tan importantes como James Jeans, Harold Jeffreys o Fred Hoyle.

Sin embargo, a pesar de sus aportaciones científicas y filosóficas, Buffon continúa siendo un completo desconocido para muchos estudiantes y profesores de ciencias... Un mal síntoma, uno más, de la preocupante situación en que se encuentra la cultura científica en nuestro país.

La conocida como Ley de Titius-Bode, una reliquia de la numerología del siglo XVIII, continúa siendo objeto de polémica en la actualidad. Para la mayoría de los astrofísicos esta supuesta ley no es más que una coincidencia, un simple juego matemático que relaciona las distancias de los planetas con respecto al Sol mediante una secuencia numérica sencilla. Sin embargo, el descubrimiento de sistemas planetarios alrededor de otras estrellas ha propiciado que algunos investigadores vuelvan a interesarse por ella.

La historia de la ciencia es mucho más viva, sutil, rica en contenidos y matices, de lo que cualquier historiador o sociólogo pueda llegar nunca a poner por escrito. Salvo en algún que otro texto de divulgación, obras donde por lo general se tiende a humanizar los hechos mediante anécdotas que ayudan a mantener la atención del lector (o a promover cierta empatía hacia un científico y sus circunstancias vitales), lo más frecuente es que los libros sobre historia de la ciencia pasen por alto las idiosincrasias personales (miedos, ambiciones, prejuicios,..) de los individuos que la practican. Sin embargo, en contra de la opinión más extendida, tanto las preferencias personales como las imaginaciones especulativas sí han jugado un papel muy importante a lo largo de la historia de la ciencia.

Durante siglos el progreso científico estuvo influenciado por algo tan poco racional y mundano como la estética. Pitágoras, Platón y Aristóteles seguían fielmente la doctrina de la unidad de las virtudes haciendo suya la expresión *kalos kagatos*, juego de palabras que se puede traducir a la vez por *bello para la vista* y *bueno por sus acciones*. Incluso a la hora de elegir una palabra para nombrar al mundo en su conjunto, griegos y latinos recurrieron a dos expresiones que literalmente significan belleza: *kósmos* y *mundus*.

En el Renacimiento la aceptación de algunas teorías por parte de la comunidad de eruditos también estuvo directamente relacionado con el grado de belleza y equilibrio de las mismas, una idea que se expresaría a través de una nueva divisa: *Pulchritudo splendor veritatis*, la belleza es el esplendor de la verdad.

Y hoy, si bien es cierto que entre los científicos no existe un lema o declaración de principios estéticos más o menos explícito bajo el cual resguardar sus investigaciones, ello no significa, ni mucho menos, que la ciencia contemporánea se encuentre libre de todo prejuicio estético. En este sentido, el físico británico Paul Dirac solía decir que era más importante tener una ecuación bella que una ecuación acorde con la experiencia. El también británico Lord Kelvin y el alemán Ludwig Boltzmann consideraban como *bellas* aquellas teorías que permitían visualizar fenómenos o proponer modelos mecanicistas. Por esta misma razón la mecánica cuántica siempre desagradó a Einstein, que la consideró *fea* por no ser determinista; mientras que a Schrödinger también le disgustaba profundamente por la imposibilidad de visualizar los fenómenos cuánticos. Más recientemente Steven Weinberg y Roger Penrose han manifestado que para ellos el atractivo estético de una teoría es una guía muy segura en su búsqueda de las leyes fundamentales de la naturaleza... Con semejantes antecedentes (y esto es sólo un breve bosquejo sobre la importancia de la belleza en el campo de la física) sería injusto no reconocer que la búsqueda de cierto equilibrio estético hayan podido influir de alguna forma en la historia de la ciencia, al menos en lo que a sus principios más teóricos y abstractos se refiere.

### LA IMPERFECCIÓN DEL CÍRCULO

Durante la Revolución Científica la geometría, la alquimia y la música eran fuente de inspiración para todos aquellos hombres de ciencia que se negaban a admitir que el orden de los planetas se pudiera deber al simple azar. Johannes Kepler, en su personal búsqueda de una arquitectura divina, retomó las ideas de Pitágoras sobre la existencia de una *diapasón harmonia* o armonía universal, llegando a afirmar en *Mysterium Cosmographicum* (1597) que el número y distancias al Sol de los planetas obedecía a un plan geométrico divino. En aquel su primer libro intentó demostrar que Dios construyó el mundo de acuerdo con los sólidos regulares o poliedros perfectos y, puesto que de éstos sólo hay cinco, sólo podía haber seis planetas. Según su razonamiento, las distancias de los planetas al Sol correspondían con círculos cuyos diámetros se obtenían intercalando entre ellos cada uno de estos cinco poliedros perfectos: cubo, tetraedro, dodecaedro, icosaedro y octaedro (Figura 4.1).

Esta compleja tramoya cayó por su propia base apenas una década más tarde, cuando tras pelear duramente con la órbita de Marte, descubrió que las órbitas de los planetas alrededor del Sol son elipses. Y no deja de ser paradójico que precisamente él, un hombre tan interesado por la armonía y el equilibrio, fuera testigo de cómo sus leyes de los movimientos planetarios eran acogidas con cierta indiferencia por razones estéticas, pues las elipses que proponía eran consideradas curvas mucho menos bellas que la circunferencia. Habrá que esperar



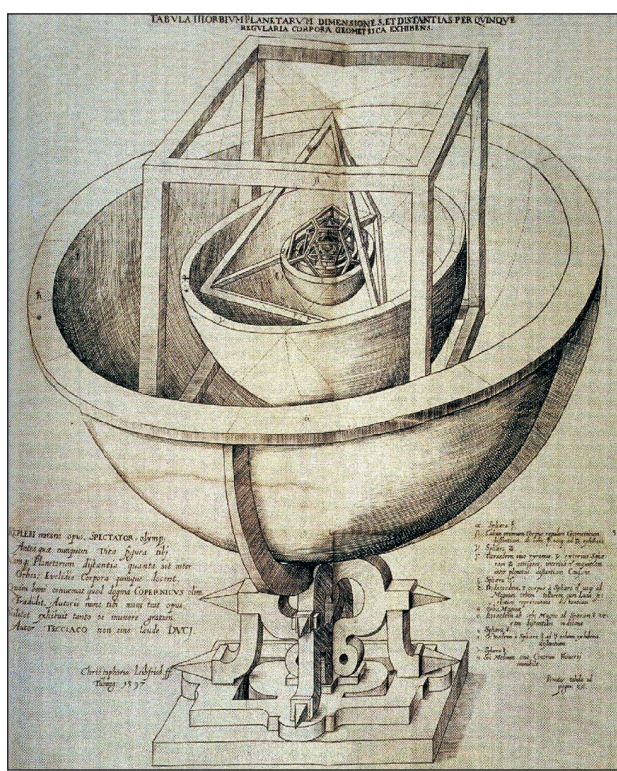


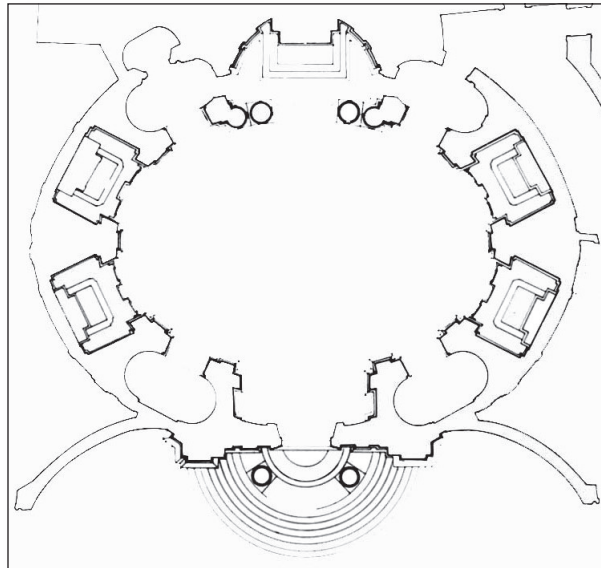
Figura 4.1. Los seis poliedros regulares y las esferas planetarias heliocéntricas tal y como aparecieron publicadas en la obra de Johannes Kepler *Mysterium Cosmographicum*, 1596 (Instituto e Museo di Storia della Scienza).

hasta el Barroco para ver cómo el arte asimila la elipse como elemento estético de primer orden (Figura 4.2). A mediados del S.XVII la elipse irrumpe en una Europa sumida en una profunda crisis política y social, pero donde prospera la ciencia y surgen grandes ingenios en todos los ramos del saber y la cultura. La elipse pasa entonces a ser sinónimo de belleza, dinamismo y sensualidad.

## INSÓLITAS PREDICCIONES

En 1877 el astrónomo norteamericano Asaph Hall descubrió Phobos y Deimos, los dos satélites naturales de Marte. Sin embargo un siglo y medio antes, en 1726, el escritor inglés Jonathan Swift se había adelantado a este descubrimiento con una sorprendente predicción. En su novela *Los Viajes de Gulliver* hacía viajar al famoso protagonista de ficción hasta el reino de Laputa (Lib. III. Cap. 3), donde unos avanzados astrónomos le aseguraron haber descubierto:

«[...]dos estrellas menores, o satélites, que giran alrededor de Marte, de los cuales el de dentro dista del centro del planeta principal exactamente tres veces su diámetro, y el de fuera cinco; el primero da una vuelta en diez horas, y el otro en veintiuna y media, de modo que los cuadrados de sus tiempos periódicos están casi en exacta proporción a los



*Figura 4.2. Planta (arriba) y cúpula (abajo) de la iglesia de Sant' Andrea al Quirinale de Roma. Proyectada por Gianlorenzo Bernini, fue construida entre los años 1658 y 1671.*

*Este templo de uno de los más claros y bellos ejemplos del empleo de la elipse en arquitectura. Con el fin de introducir una mayor sensación de movimiento, a mediados del siglo XVII el plano circular del Renacimiento se extiende hasta la forma ovalada preferida por los arquitectos del Barroco. Casi al mismo tiempo, la elipse revoluciona la ciencia (las órbitas de los planetas son elipses) y el arte (esta curva es sinónimo de movimiento y sensualidad).*

*cubo de sus distancias del centro de Marte, lo que prueba de modo evidente que están sometidos a la misma ley de gravedad que actúa sobre los demás cuerpos celestes».*

Veinticinco años después, y siguiendo la estela de este repentino interés por la anticipación científica, sería el filósofo francés Voltaire quien en su cuento *Historia Filosófica de Micromegas* (1752) realizara una afirmación parecida (Cap. 3):

*«[...]costearon el planeta Marte el cual, como todos saben, es cinco veces más pequeño que nuestro glóbulo; y vieron dos lunas que sirven a este planeta, y no han podido descubrir nuestros astrónomos».*

Defensores de las pseudociencias han utilizado estas coincidencias para nombrar a Swift y Voltaire herederos de sabidurías herméticas o extraterrestres. La explicación real, y sin duda más interesante, es que ambos conocían las obras de Newton y Kepler, y eran aficionados a la numerología. Su razonamiento era el siguiente: si alrededor de Venus no se habían descubierto satélites, nuestro planeta sólo tenía uno y Júpiter mostraba cuatro, a Marte debían corresponderle dos. Swift aplicó luego la ley de gravitación universal de Newton y la tercera ley de Kepler para calcular los períodos de dos cuerpos situados lo bastante cerca de Marte como para tener órbitas estables. Sin embargo se confundió en esta última suposición, pues la pequeña Phobos es un asteroide capturado y cuenta con una órbita anómalamente inestable (se estima que en unos 100 millones de años podría colisionar contra Marte).

## TITIUS Y BODE

El año 1766 marcó un antes y un después en las investigaciones numerológicas. Ese año, Johann Daniel Titius, un profesor de matemáticas de Wittemberg (Alemania), decidió que *el Creador* no podía haber dejado vacío el espacio que se extiende entre la órbita de Marte y Júpiter. Descubrió que si se admite la existencia de un objeto suplementario en este espacio, los semiejes mayores de las órbitas formaban una sucesión geométrica de razón 2, es decir, una sucesión de números proporcionales a  $2^n$ . Titius, prudente, evitó proclamar a los cuatro vientos su descubrimiento pero decidió incluirlo en el prólogo de la traducción alemana que estaba efectuando del libro *Contemplation de la nature*, del naturalista suizo Charles Bonnet. Seis años más tarde, en 1772, otro alemán de nombre Johann Bode, leyó la introducción escrita por Titius. Entusiasmado por esta original formulación la mencionó en un libro de divulgación sobre astronomía, pero sin hacer referencia ni a Bonnet ni a su verdadero autor. Desde entonces esta expresión matemática

se conoce popularmente con el injusto nombre de Ley de Bode, aunque en un reciente intento por hacer justicia histórica suele escribirse primero el nombre de Titius.

En la forma presentada por Bode, la secuencia clave de números es 0, 3, 6, 12, 24, 48, 96... donde cada número después del 3 dobla al precedente. Luego se suma 4 a cada cifra y finalmente se divide entre 10. Si la distancia de la Tierra al Sol se fija en una Unidad Astronómica (150 millones de kilómetros), entonces la distancia de Mercurio, Venus y Marte son las distancias equivalentes dadas por la serie 0,4 0,7 y 1,6, casi exactamente las distancias predichas por esta ley. Animado por el descubrimiento de Urano (1781) a una distancia compatible con la progresión numérica, Bode logró convencer a algunos astrónomos escépticos para que buscaran activamente el planeta que faltaba a la distancia 2,8 entre Marte y Júpiter. El éxito superó todas las expectativas y el 1 de enero de 1801 el monje Giuseppe Piazzi, profesor de matemáticas y astronomía en Palermo, descubría el primer asteroide, Ceres, mucho más pequeño que los planetas conocidos pero en la posición esperada.

Aunque Neptuno y Plutón no tienen órbitas que encajen en las predicciones de la Ley de Titius-Bode (Ver tabla), recientemente se ha reavivado el interés por la posibilidad de que alguna regla empírica sencilla de este tipo pueda tenerse en cuenta en el estudio de las lunas de los planetas gaseosos del sistema solar exterior. Los partidarios de esta teoría han afinado los cálculos sustituyendo la razón 2 por un número no entero (1,73) atenuando considerablemente con ello el supuesto carácter *mágico* de la ley. Además, cada uno de los sistemas de satélites parecen obedecer a una ley similar, siendo el valor de cada razón: 1,57 para los satélites de Júpiter, 1,54 para Saturno, 1,45 para

### LEY DE TITIUS - BODE

CUERPO	Secuencia n	+ 4	Distancia Ley T-B	Distancia real	Error (%)
Mercurio	0	4	0,4	0,38	3,2
Venus	3	7	0,7	0,72	3,3
Tierra	6	10	1,0	1,00	0,0
Marte	12	16	1,6	1,52	4,5
Asteroides	24	28	2,8	2,76	1,2
Júpiter	48	52	5,2	5,20	0,1
Saturno	96	100	10,0	9,55	4,4
Urano	192	196	19,6	19,21	1,9
Neptuno	384	388	38,8	30,11	28,9
Plutón	768	772	77,2	39,43	48,9



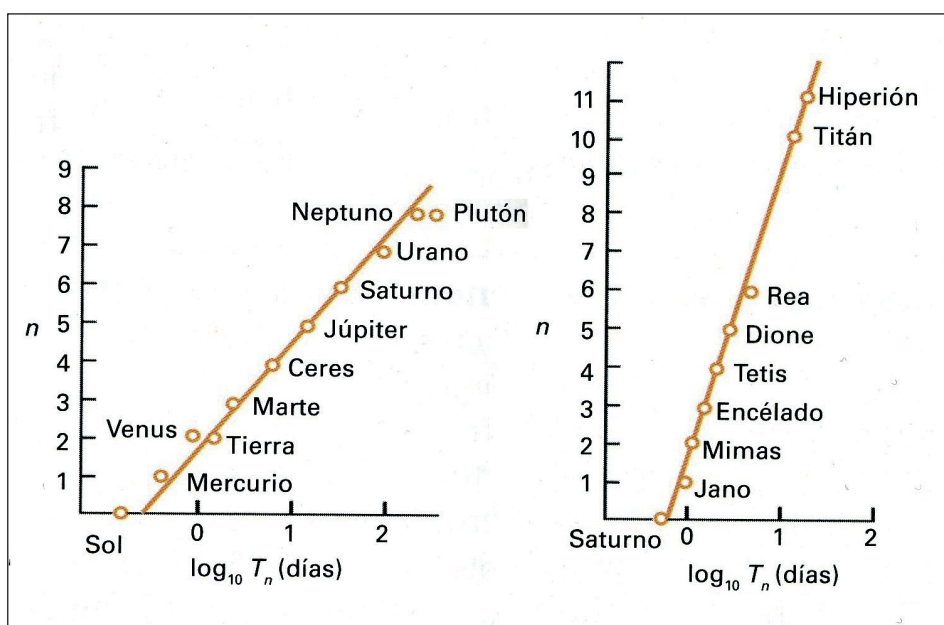


Figura 4.3. Representación gráfica de la Ley de Titius-Bode para el Sistema Solar y el sistema de satélites de Saturno. Nótese que en este último caso existen huecos para varios valores de  $n$  (Modificado de Galadí-Enríquez y Gutiérrez, 2001).

Urano y 1,8 para Neptuno (Figura 4.3). Además, debemos tener en cuenta el descubrimiento de tres planetas en órbitas alrededor del púlsar PSRB1257+12, órbitas con semiejes (distancias) que coinciden con nuestro sistema planetario interior. Los investigadores Tsevi Mazeh e Itzhak Goldman, de la Universidad de Tel Aviv, han señalado que las razones de dichas distancias: 0,4 0,7 y 1 son prácticamente iguales que las de la Tierra, Venus y Mercurio. Así pues, contra todo pronóstico, *la Ley* podría funcionar para los planetas que giran en torno a este púlsar.

¿Significa esto que la Ley de Titius-Bode podría estar enmascarando algún proceso físico relacionado con la formación del Sistema Solar? Las opiniones están divididas. Para algunos investigadores una serie concreta de unos pocos números siempre se puede hacer coincidir con alguna expresión matemática más o menos sencilla sin que ello implique necesariamente que deba tener algún significado especial. Para otros, este juego de números verdaderamente podría responder a una consecuencia de la evolución dinámica del sistema, como fuertes resonancias orbitales iniciales u otros fenómenos parecidos que pudieron afectar al disco protoplanetario.

Resulta ciertamente difícil encontrar en la actualidad un científico que considere la fórmula de Bode como una ley inmutable de la naturaleza, a pesar

de lo cual tampoco ha sido tajantemente descalificada. Por razones que nadie sabe explicar, este relictos de la numerología no ha sido mala predictora, al menos en el Sistema Solar, e incluso podría ofrecernos nuevas sorpresas a medida que vayamos descubriendo y conociendo nuevos sistemas planetarios. Quién sabe, tal vez después de todo debamos tener en cuenta la magia y la belleza a la hora de explorar nuestra vecindad cósmica.



## 5. VISIONARIOS DE LA FRONTERA

En el último medio siglo hemos logrado pasear por la Luna, construir estaciones espaciales y explorar nuestra vecindad planetaria mediante sondas robóticas. Pero mucho antes de que esta frontera científica fuera una realidad algunos pioneros habían forjado ya sus cimientos a golpe de creatividad. Hoy, gracias al empeño y voluntad de quienes un día soñaron con alcanzar las estrellas, la humanidad comienza a dar sus primeros pasos por el espacio.

Cuando Julio Verne comenzó a escribir artículos sobre ciencia a finales del siglo XIX, la ingeniería y la exploración reinaban en Francia fruto del proceso de industrialización, el desarrollo técnico y la colonización. En este ambiente Verne no tardó en considerar la posibilidad de incorporar toda esa documentación técnica, que tanto interés despertaba entre los asiduos lectores de sus relatos, en un nuevo género, al que denominaría *novela de ciencia*. Uno de los máximos exponentes de este recién nacido género fue su obra *De la Tierra a la Luna* (1865), novela que llegaría a influir decisivamente en la vida de algunos de los hombres que hicieron posible los vuelos espaciales.

También fue a finales del siglo XIX cuando la reproducción realista de los fenómenos naturales se reveló como una valiosa herramienta científica, iniciándose entonces una perfecta simbiosis entre ciencia y arte, estrecha relación que ha llegado hasta nuestros días. Las ilustraciones claras continúan siendo imprescindibles cuando el objetivo es exponer un tema científico ante un público profano, sea éste un grupo de escolares o investigadores de otra disciplina. Sin ir más lejos, las reconstrucciones e ilustraciones sobre el origen del Sistema Solar, la historia de nuestro planeta y la evolución de los demás cuerpos planetarios que aparecen tanto en manuales universitarios como en libros de texto son fruto del trabajo y una estrecha colaboración entre científicos y artistas.

### PAISAJES DE LA IMAGINACIÓN

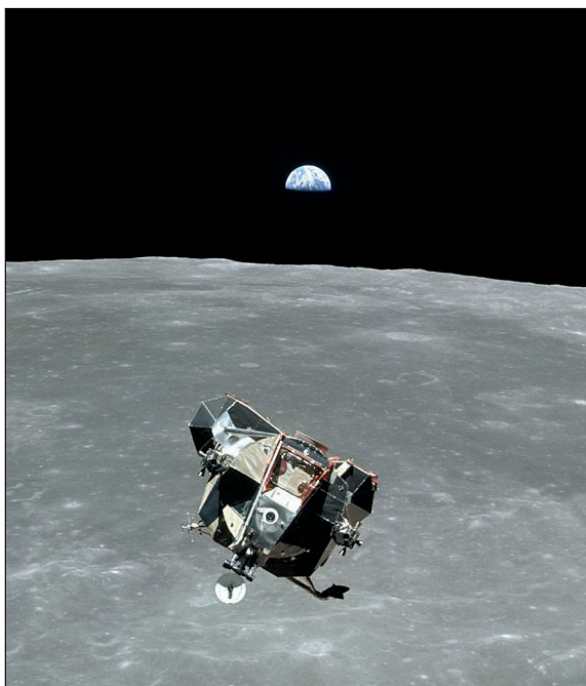
A pesar de nacer quince años antes del vuelo de los hermanos Wright y treinta y ocho del lanzamiento del primer cohete propulsado por combustible

líquido, Chesley Bonestell inspiró con sus obras a la generación de científicos e ingenieros que a comienzos de los años sesenta emprendieron la exploración del Sistema Solar. Comenzó su carrera profesional como delineante e ilustrador para arquitectos de gran prestigio, participando en proyectos como el edificio Chrysler de Nueva York o el puente Golden Gate de San Francisco. En 1938, cumplidos los cincuenta años, se trasladó a Hollywood y dio comienzo a una carrera radicalmente distinta pero muy lucrativa: pintor de decorados y efectos especiales para el cine (la primera película para la que trabajó fue *Ciudadano Kane*, de Orson Welles). Ya en la década de los cincuenta trabajaría en la adaptación cinematográfica de varios clásicos de la ciencia-ficción, entre ellos *Con destino a la Luna* y *La Guerra de los Mundos*. Acabó siendo el artista decorador mejor pagado de la industria cinematográfica, gracias a lo cual pudo entregarse plenamente a su principal afición: la ilustración astronómica.

Los paisajes planetarios imaginados por Bonestell no tardaron en aparecer publicados en las principales revistas de divulgación y ciencia-ficción de Estados Unidos. Entre los años 1944 y 1952 ilustró una serie de artículos para las revistas *Life*, *Scientific American* y *Collier's* que llamaron la atención tanto del gran público como de la comunidad científica. Por aquel entonces un joven escritor llamado Arthur C. Clarke llegó a escribir un artículo sobre Bonestell en el que afirmaba, casi como si de una profecía se tratara: «*Es probable que en los años venideros sean muchas las imaginaciones que encienda y, en consecuencia, que cambie muchas vidas*» (Figura 5.1).



Figura 5.1. Descenso sobre la Luna, cuadro pintado por Bonestell en 1953 (derecha), cuatro años antes de que diera comienzo el programa espacial soviético y dieciséis antes de que el módulo lunar estadounidense Eagle (página siguiente) de la misión Apollo 11 se posara en el Mar de la Tranquilidad (Miller, 1994 y JPL/NASA)



Y así fue. Bonestell pronto se convirtió en colaborador habitual de Willy Ley, historiador y divulgador científico de origen alemán que había sido miembro de la *Verein für Raumschiffahrt* (Sociedad de Viajes Espaciales). También trabajó estrechamente con Wernher von Braun, el hombre que hizo posible el sueño de alcanzar la Luna. Éste, impresionado por el buen ojo (bien entrenado) que Bonestell tenía para la exactitud científica e ingenieril, escribió a propósito de su obra: *«son mucho más que reproducciones de hermosas y etéreas pinturas de los mundos del más allá. Presentan el retrato más exacto de aquellos lejanos cuerpos celestes que la ciencia moderna puede ofrecer»*.

Aunque ya en la década de los 50 las revistas *pulp* convirtieron los viajes espaciales en un tema familiar para los estadounidenses, al escribir sobre ellos periodistas e investigadores los relegaban siempre a un futuro lejano. Pero el mensaje que transmitía Bonestell en colaboración con von Braun y Willy Ley era bien distinto: los humanos podían aventurarse en el espacio valiéndose tan sólo de la tecnología y los materiales ya existentes. Esto quedaba plasmado en sus trabajos de divulgación, donde llegaban a ofrecer al público páginas de cálculos y listas de materiales y costes. Gracias a esta intensa labor de «popularización», científicos y políticos comenzaron a reconocer que el inicio de la exploración espacial no era tanto cuestión de tiempo o tecnología como de presupuesto y motivación. Quienes instaban al gobierno estadounidense a iniciar un programa espacial ya no parecían alocados visionarios. El lanzamiento del *Sputnik 1*

en plena Guerra Fría fue el detonante para que la carrera por el espacio diera comienzo (Figura 5.2).



*Figura 5.2. En la década de los 60 Bonestell vio convertida en realidad la exploración tripulada del espacio. Cuentan que observó malhumorado como las suaves colinas lunares fotografiadas por las misiones Apolo se parecían muy poco a los aserrados y abruptos paisajes de sus pinturas (En Hardy, 1989).*

Bonestell continuó trabajando hasta su fallecimiento en 1986. Además de crear un nuevo género pictórico, contribuyó en la creación de un ambiente favorable hacia la exploración espacial. Demostró que el arte, la ciencia y la educación pueden ser complementarias, una importante lección que no debiéramos olvidar, pues como tan acertadamente afirma el artista y divulgador Jon Lomberg: *«las generaciones de analfabetos científicos que tanto nos preocupan requieren imágenes si pretendemos que lean y escuchen nuestros mensajes»*.

## **NACE UNA FRONTERA**

64 Los primeros pasos de la geología planetaria como disciplina científica se remontan a los tiempos de Galileo y sus primeras observaciones astronómicas



a través del telescopio. Ya en su opúsculo *Sidereus Nuncius*, editado en 1610, se atreve a comparar los atributos geológicos de la Tierra con los de la Luna:

*«Ciertamente, nunca nadie las observó antes que nosotros, por lo que de las tantas veces repetida inspección de las mismas hemos derivado la opinión, que tenemos por firme, de que la superficie de la Luna y de los demás cuerpos celestes no es de hecho lisa, uniforme y de esfericidad exactísima, tal y como ha enseñado de ésta y de otros cuerpos celestes una numerosa cohorte de filósofos, sino que, por el contrario, es desigual, escabrosa y llena de cavidades y prominencias, no de otro modo que la propia faz de la Tierra, que presenta aquí y allá las crestas de las montañas y los abismos de los valles».*

A pesar de tan prometedores comienzos, no fue hasta el siglo XIX cuando el continuo perfeccionamiento del telescopio permitió abordar la exploración sistemática de nuestra vecindad planetaria. En esta época se confeccionan los primeros mapas relativamente detallados de la superficie lunar y marciana, siendo especialmente famosos las contribuciones de Giovanni Schiaparelli y Percival Lowell, trabajos que servirán de base para una nueva rama de la astronomía: la *Areología* (llamada así en honor al dios griego Ares, Marte en el panteón romano), término que nunca llegó a consolidarse entre la comunidad científica. Hacia 1880 los astrónomos acuñaron otro término de corte reduccionista: *Selenología* (de Selene, diosa griega de la Luna) para nombrar a la disciplina encargada de estudiar todos los aspectos relacionados con la Luna. En una época en la que los astrónomos planetarios se empeñaban en compartimentar el estudio y conocimiento sobre los distintos cuerpos planetarios, sólo el divulgador científico francés Camille Flammarion se atrevió a introducir un espíritu holístico conciliador, hablando abiertamente en sus obras de Geología lunar y marciana.

A pesar de los esfuerzos de Flammarion, a comienzos del siglo XX tampoco era frecuente oír hablar de la geología de los planetas. Los dos grandes personajes de la investigación planetaria en esta época fueron el Premio Nobel de química Harold Urey, quien se centró en el estudio del origen y evolución de los planetas desde la perspectiva de la química; y el astrónomo Gerard Kuiper, que trabajó en el campo de los cometas y las atmósferas de los gigantes de gas. Hubo que esperar hasta la década de los sesenta, con el Proyecto Apolo ya en marcha, para que investigadores de todo el mundo se interesaran por la geología de los planetas, en especial por la de la Luna. Este interés culminó el 11 de diciembre de 1972, cuando el Apolo 17 alcanzó su objetivo. Hasta la fecha todos los astronautas del programa espacial estadounidense habían seguido cursos de astronomía y geología con el fin de cumplir sus misiones de exploración con la mayor eficacia posible, sin embargo, faltaba que el ojo de un experto pudiese recoger aquella información que se escapa a quien no es especialista.



La NASA, consciente de esta necesidad, decidió reclutar científicos para darles la formación que correspondía a un astronauta. De este equipo sólo el geólogo Harrison Schmitt fue elegido para ir a la Luna a bordo del último Apolo, y pasará a la historia por ser el primer científico en pisar su superficie.

Poca gente sabe que cincuenta años antes de que Schmitt llegara a la Luna hubo un hombre que se tomó muy en serio la geología de nuestro satélite. Su nombre era Alfred Lothar Wegener, y estaba llamado a ser el gran profeta de las modernas geociencias. Wegener es conocido en el ámbito de la geología por ser el padre de la hipótesis de la deriva continental. En su libro *Origen de los continentes y océanos* (1915) defendió la idea de que todos los continentes estuvieron unidos en uno sólo (Pangea) durante la era Mesozoica, y después fueron fragmentándose hasta adoptar la forma y posición actuales. Esta hipótesis fue espectacularmente confirmada durante la década de los setenta del pasado siglo XX; sin embargo medio siglo antes Wegener fue prácticamente ignorado por carecer de credenciales como geólogo (aunque en algunas enciclopedias aparezca como tal). Fue un investigador con muchas inquietudes. Físico de formación, se doctoró en Astronomía con una tesis sobre las Tablas Alfonsinas. Trabajó como profesor de meteorología y geofísica, pero sus grandes pasiones eran los viajes en globo y la exploración de Groenlandia, donde murió en 1930 durante el transcurso de una expedición.

Al término de la Primera Guerra Mundial, Wegener fue contratado como profesor de meteorología y geofísica por el Instituto de Física de Marburgo. En el invierno de 1918 a 1919 se dedicó a investigar sobre el origen de los cráteres lunares, comenzando por recopilar bibliografía y experiencias de otros investigadores. El resultado de este trabajo fue un artículo titulado *El origen de los cráteres lunares* (1921), donde pasaba revista a todas las hipótesis que sobre el tema existían hasta el momento, origen volcánico fundamentalmente. Además, expuso los resultados de sus propias experiencias haciendo cráteres de impacto con barro y comparando la morfología de las estructuras que obtuvo en sus ensayos con la de volcanes terrestres y cráteres lunares (Figura 5.3). Finalmente llegó a la conclusión de que los cráteres de nuestro satélite se habían formado por impacto, pero advertía sobre la necesidad de estudiar (y encontrar) estructuras semejantes en la Tierra.

El encargado de llevar a cabo esta difícil tarea fue el norteamericano Eugene Shoemaker, el primer geólogo que demostró sin ambigüedades que el Meteor Crater de Arizona tiene su origen en un impacto meteorítico, y por ello, es considerado el padre de la Geología Planetaria. Participó como investigador en las misiones *Orbiter*, *Ranger* y *Apolo* (Figura 5.4); adiestrando como geólogo a los astronautas que recogieron las primeras muestras rocosas lunares. Sus aportaciones en el reconocimiento de las estructuras de impacto

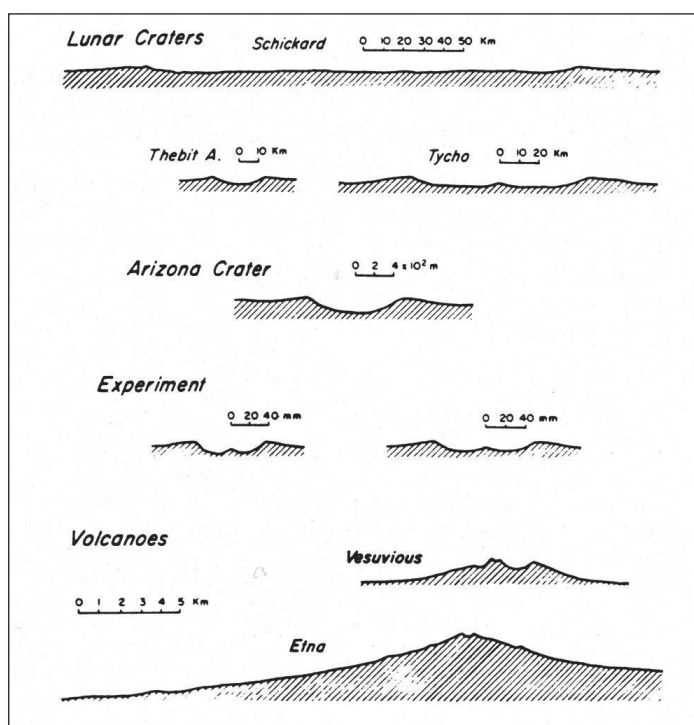


Figura 5.3. Figura del trabajo original sobre cráteres lunares publicado por Wegener en 1921. En ella compara los perfiles de: cráteres lunares (Tycho), cráteres terrestres (como el Meteor, que él llama «de Arizona»), con los perfiles obtenidos en sus experimentos y la forma de dos volcanes terrestres, el Vesubio y el Etna (Wegener, 1975).

en la Tierra fue el detonante para aceptar el origen meteorítico de los cráteres lunares (y el de los demás cuerpos del Sistema Solar), tal y como predijera Wegener treinta años antes (Figura 5.5). El reconocimiento a toda una vida de trabajo en el estudio de los impactos asteroidales como proceso geológico de primera magnitud llegó en 1994, cuando el cometa Shoemaker-Levy 9 colisionó espectacularmente contra Júpiter.

En apenas una década Alfred Wegener afrontó y encarriló la solución de los dos grandes problemas geológicos del siglo XX: el movimiento de las masas continentales y el origen de los cráteres de la Luna por impactos meteoríticos. Aunque la Geología ha rebasado las fronteras de la Tierra, el espíritu de Wegener continúa estando presente en la moderna investigación planetaria: la posibilidad de que cuerpos como Marte o Venus puedan haber conocido en algún momento de su historia un episodio de tectónica de placas, y el reconocimiento de estructuras de impacto en todos los cuerpos sólidos del Sistema Solar, así lo evidencian.

Quizá sea exagerado considerar a Wegener un visionario de la frontera espacial, pero de lo que no cabe duda es que su legado científico forma parte de ella y aún está de plena actualidad casi 100 años después.

Figura 5.4. El geólogo Eugene Shoemaker participó como investigador en las misiones Orbiter, Ranger y Apolo. Esta imagen fue tomada a finales de la década de los 60 en su laboratorio de Geología Planetaria, y en ella se puede apreciar algunas de sus herramientas de trabajo: fotografías en papel, mapas, lápices de colores y una lupa de mesa; con ellos forjó una nueva disciplina científica, la Astrogeología, (hoy Geología Planetaria) (USGS/NGS).

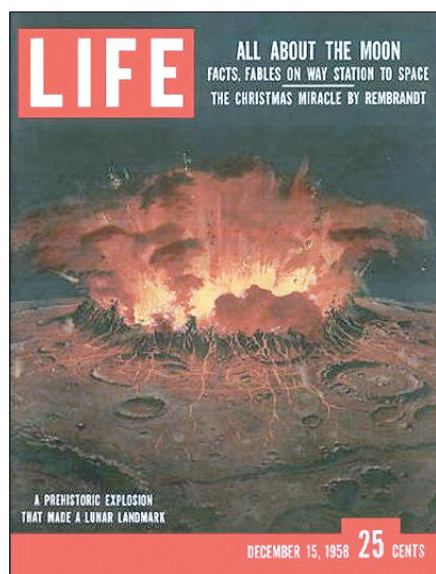


Figura 5.5. Portada de la revista Life del 15 de diciembre de 1958. En ella Bonestell recrea la formación de un cráter lunar mediante una "explosión prehistórica". En aquella época se pensaba que éstos tenían un origen volcánico. Aún habría que esperar una década para que el geólogo Eugene Shoemaker propusiera y popularizara la idea de su origen por impacto.

## 6. SERENDIPIA

En ciencia, como en cualquier otra actividad humana, existen las casualidades. Los anecdotarios de divulgación científica están repletos de accidentes, coincidencias y hechos sorprendentes que han sido claves a la hora de realizar nuevos descubrimientos o iniciar productivas líneas de investigación. A esta particular forma de progresar en ciencia se la conoce con el peculiar nombre de *serendipia*.

La secuencia o método científico de corte inductivista que recogen los libros de texto (esto es: observación, hipótesis, experimentación, contrastación, etc.) dista mucho de ser el procedimiento estándar entre los investigadores de todo el mundo. Desde hace medio siglo los epistemólogos aceptan que los científicos no abordan los problemas como si fueran recetas de cocina, y por la misma razón de que no existe un método científico unificado, no se puede hablar de una única forma de progreso científico. Más allá de unos supuestos estándares existen factores como el instinto, los accidentes, las coincidencias y las felices casualidades. Cuando éstas últimas son responsables de un importante hallazgo o descubrimiento, los investigadores hablan entonces de serendipia.

La palabra serendipia fue acuñada en 1754 por el novelista inglés Horace Walpole, quien confesó haberse inspirado en un cuento (hoy perdido) titulado *Los tres príncipes de Serendip*, donde los protagonistas realizaban continuamente descubrimientos sin pretenderlo y resolvían problemas por casualidad. Walpole recurrió al término *serendip* (antiguo nombre de Ceilán, la actual Sri Lanka) para describir algunos de sus propios descubrimientos accidentales. El término fue redescubierto por la comunidad científica a mediados del pasado siglo XX, y desde entonces ha sido empleada con tal frecuencia que incluso los principales diccionarios de inglés lo recogen entre sus páginas (*serendipity*).

La historia de la Astronomía es un campo sembrado de serendipia: desde la identificación del eco del Big Bang por Penzias y Wilson en 1965, hasta el descubrimiento de los púlsares por Jocelyn Bell y Anthony Hewish en 1967,

pasando por la detección de la primera erupción volcánica extraterrestre por Linda Morabito en 1979, o el inesperado hallazgo de los anillos de Urano en 1977. Sin embargo, el caso quizá más paradigmático se produjo en 1978, cuando la avería de un instrumento de un laboratorio llevó al astrónomo James Christy a descubrir Caronte, la esquiwa luna de Plutón. Al parecer Christy se encontraba midiendo las características de Plutón con la ayuda de un aparato llamado *explorador estelar*, cuando se percató de la existencia de una pequeña protuberancia borrosa en la imagen del planeta. Inmediatamente interpretó aquella como un problema en la exposición de la película, un fallo sin importancia. El cúmulo de casualidades comenzó cuando el instrumento que estaba utilizando dejó de funcionar en ese preciso instante. Llamó a un técnico para que echara un vistazo a la máquina, y éste le pidió a Christy que permaneciera en el laboratorio por si necesitaba ayuda mientras intentaba repararla. Con el fin de entretenerse durante el tiempo que el técnico invertía en reparar el *explorador estelar*, Christy estudió la fotografía con más calma y decidió echar un vistazo en los anteriores archivos fotográficos del planeta. El primero que encontró tenía marcado el siguiente texto: «*Imagen de Plutón. Alargada. Placa no buena. Rechazada*». Continuó buscando entre los archivos y encontró seis imágenes más fechadas entre 1965 y 1970 que mostraban el mismo (ahora sí sospechoso) bulto borroso. Investigaciones adicionales probaron que aquella mancha no era sino una luna del planeta... Si el escáner estelar no se hubiera estropeado cuando lo hizo, el técnico no le hubiera pedido a Christy que permaneciera en el laboratorio durante la reparación (en vez de ir a tomar café, como suele suceder en estos casos), o simplemente no se hubiera aburrido lo suficiente como para decidir echar un vistazo en los archivos, ¿habría realizado Christy este importante descubrimiento?

## MARTE PARA PRINCIPIANTES

Hasta 1999 la ortodoxia sobre la geología marciana sostenía que en Marte nunca pudo existir tectónica de placas. Los principales argumentos esgrimidos eran dos: una supuesta energía interna insuficiente, y las anomalías gravimétricas detectadas por las sondas *Viking*. Esas eran las de mayor entidad descubiertas hasta la fecha, y venían a confirmar que la litosfera<sup>1</sup> del planeta debía ser lo suficientemente gruesa, fría y rígida como para sostener los edificios volcánicos más grandes del Sistema Solar. El primero en nadar contra corriente fue un investigador de la Universidad de Nuevo México llamado Kent Condie, quien en 1989 propuso un sencillo modelo de evolución térmica para los planetas

---

1. Empleo el término *litosfera* para referirme a la capa superior de un planeta, que comprende tanto la corteza como la parte más externa y rígida del manto.



rocosos; historia que se sintetizaría en un enfriamiento monótono a partir del calentamiento y fusión generalizada que tuvo lugar hace 4.500 millones de años, durante la fase primordial de acreción. Idealmente, en algún momento de su historia, todos los cuerpos telúricos pudieron conocer un episodio transitorio de tectónica de placas en el intervalo entre la formación de una capa exterior rígida, la litosfera, y el agotamiento térmico (enfriamiento) del planeta. Condie sugirió una ventana de tectónica para Marte de unos 100 a 200 millones de años de duración y 4.000 millones de años de antigüedad.

En 1996 un grupo de estudiantes del Seminario de Ciencias Planetarias de la Universidad Complutense de Madrid decidimos comenzar a trabajar sobre la geología de Marte, para lo cual elegimos una región poco conocida del planeta. El sector seleccionado recibía en los mapas el atractivo nombre de Arabia Terra, una extensa región del hemisferio Norte marciano que en un primer vistazo nos pareció que mostraba un aspecto muy prometedor. Un año después los resultados de nuestra investigación eran cuanto menos sorprendentes: sólo podíamos interpretar nuestra zona de estudio desde la perspectiva de la tectónica de placas, el paradigma de la geología terrestre que conocíamos desde el Bachillerato. Sabíamos que nos alejábamos de la ortodoxia y el paradigma reinante, pero como estábamos seguros de nuestros datos, y a fin de cuentas no teníamos que justificarnos ante nadie, decidimos nadar contracorriente.

Conocíamos el trabajo de Condie pero necesitábamos un apoyo mucho más firme<sup>2</sup>, así que buceamos un poco más en la bibliografía. Descubrimos que apenas dos años antes, en 1994, un geofísico norteamericano llamado Norman H. Sleep había propuesto un interesante modelo de tectónica de placas para el Marte primordial. Con el inesperado sustento de un marco de referencia teórico casi perfecto, nos animamos a enviar nuestras conclusiones a la revista internacional *Earth, Moon and Planets*; pero aquello no iba a ser precisamente un paseo. Después de un año de duras revisiones que a punto estuvieron de hacernos desistir en el empeño (los revisores anónimos de la revista se resistían a admitir las evidencias que presentábamos), aquel trabajo fue aceptado por el editor a finales de 1998 y publicado en la primavera de 1999 bajo el extenso título de *Arabia Terra, Marte: evolución tectónica y paleoclimática de un sector destacado de la litosfera marciana* (ver la bibliografía). La mayoría de los firmantes éramos estudiantes de la Licenciatura en Geología y rondábamos los veintipocos años (Figura 6.1).

---

2. Condie pensaba que cuanto mayor es el tamaño de un cuerpo planetario mayor es su energía interna y más vigorosa es la convección que facilita el movimiento de las placas litosféricas. Sin embargo esta idea es errónea, pues lo que realmente determina el modo convectivo de un cuerpo es el contraste de viscosidades que existe entre los materiales a lo largo del manto, factor que a su vez está íntimamente ligado al contraste de temperaturas.

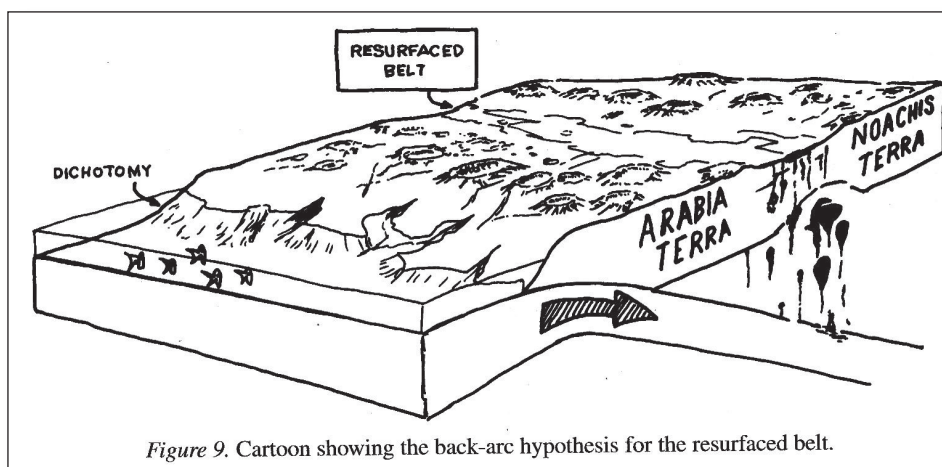


Figure 9. Cartoon showing the back-arc hypothesis for the resurfaced belt.

*Figura 6.1. Detalle ampliado de un bloque diagrama que fue publicado en el artículo de Earth Moon and Planets, y con el que quisimos sintetizar tanto el marco geológico como el paleoclima de Arabia Terra. Según nuestra interpretación, Marte debió conocer un episodio de tectónica de placas y un antiguo océano. Como se puede ver, incluso nos atrevimos a dibujar una antigua línea de costa (es decir, una playa)... ¡con peces maricanos! Con esta pequeña maldad quisimos resarcirnos de las duras críticas iniciales a las que nos sometieron los revisores (Anguita et al. 1999).*

La cosa no habría ido a mayores de no ser por un posible error humano y una segura coincidencia histórica. Por alguna desconocida razón uno de los paneles solares de la sonda *Mars Global Surveyor* (MGS) se torció, lo que obligó a modificar la estructura de la misión, prolongando la fase de aerofrenado (una delicada maniobra en la que la tenue atmósfera marciana va frenando gradualmente la nave por rozamiento) destinada a circularizar y estabilizar en una órbita polar la sonda planetaria. Esta etapa abarcó desde el otoño de 1997 hasta finales de 1998, y durante este intervalo la sonda pasó repetidamente muy cerca (hasta un mínimo de 101 kilómetros) de la superficie del planeta.

A cotas tan bajas, el magnetómetro de la nave comenzó a registrar valores significativos de magnetismo. Puesto que Marte carece de un magnetismo dipolar como el terrestre, era evidente que se trataba de un magnetismo remanente, es decir, de un antiguo campo fosilizado en la corteza marciana que presentaba máximos y mínimos alternantes con una estructura bandeada. La revista *Science* publicó la noticia bajo el titular «Signo de tectónica de placas en el Marte recién nacido» (Figura 6.2).

El mismo día que llegó aquel número de *Science* a la biblioteca de la Facultad de Geología de la Universidad Complutense, recibimos un E-mail de Stephen Clifford, investigador del Lunar and Planetary Institute de la NASA. En él nos daba la enhorabuena por lo que, según él, era una coincidencia «increí-

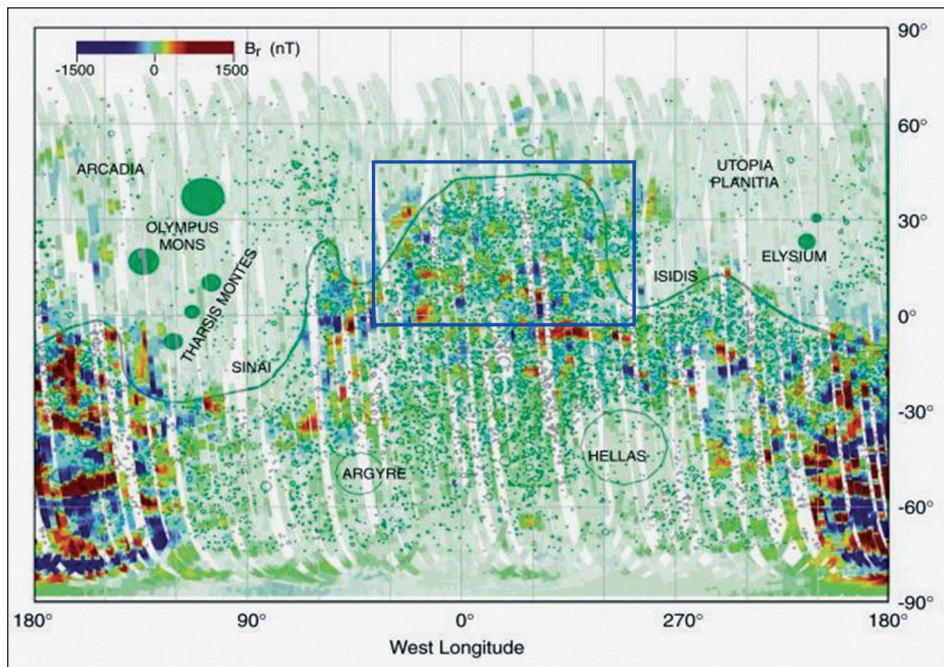


Figura 6.2. Mapa de anomalías magnéticas en Marte. En el recuadro azul se ha destacado la región de Arabia Terra. Como se puede apreciar, una tenue y discontinua anomalía de color verde atraviesa el recuadro de Este a Oeste. La intensidad del campo viene dada en nanoteslas (nT) (Connerney et al. 1999).

Date: Thu, 06 May 1999 08:10:38 -0500  
 From: "Clifford, Stephen"  
 Subject: Plate tectonics and magnetic anomalies on Mars

Hi Francisco,

I just happened to come across your recent paper in Earth, Moon and Planets on possible evidence of plate tectonics in the region east of Valles Marineris. As I'm sure you've already noted, the area you identify coincides almost perfectly with one of the regions of magnetic striping reported in the latest issue of Science. While I'm not totally convinced that plate tectonics can account for the occurrence of all of the striping (particularly in the major concentration southwest of Tharsis), the coincidence between the striping and your interpretation of the area you mapped is amazing. Congratulations.

-Steve

Figura 6.3. Texto del correo electrónico enviado por el investigador Stephen Clifford, del Instituto Lunar y Planetario (LPI) dándonos la enhorabuena por la «fantástica» coincidencia (o predicción, según se quiera ver) entre los resultados presentados en nuestro artículo y las supuestas anomalías magnéticas entonces recién descubiertas por la nave Mars Global Surveyor (Cortesía de Francisco Anguita).

ble»: una de las anomalías magnéticas detectada por la MGS podría confirmar las conclusiones de nuestro trabajo (Figura 6.3). Así, de la noche a la mañana, un artículo que nadaba contra corriente podía ser el primero en confirmar el modelo de tectónica de placas que Sleep propuso para Marte.

Durante las siguientes semanas comenzaron a publicarse nuevos datos sobre el tema, y los partidarios de la tectónica marciana comenzaron a salir, nunca mejor dicho, hasta de debajo de las piedras. Paradójicamente, cuando el viento parecía soplar a favor, el asunto nos desbordó y lo dejamos pasar... Al fin y al cabo, ¿quién podía pedirle más a un grupo de estudiantes de segundo y tercer curso de la Licenciatura en Geología? Habíamos jugado en primera división y lo habíamos hecho como auténticos profesionales. Hoy, muchos son los investigadores que no comparten la idea de que Marte haya conocido un episodio de tectónica de placas, e incluso hay quienes plantean serias objeciones sobre la propia existencia de las anomalías magnéticas lineales. Pero eso ya no importa, pues aprender a aceptar la derrota también forma parte del juego de la ciencia.

Se suele atribuir a Goethe la frase *sólo somos capaces de ver aquello que conocemos*, lo que explicaría porqué más de un investigador ha tenido justo debajo de sus narices un descubrimiento pero no ha sido capaz de verlo o intuirlo. ¿Qué factor es el que determina que en igualdad de condiciones, o incluso con muchos menos medios, unos investigadores puedan ver lo que otros ni tan siquiera imaginan? ¿Es una pura cuestión de serendipia? Después de haber protagonizado un hecho así, personalmente creo que no. Hace más de un siglo el químico y bacteriólogo francés Luis Pasteur nos dio una respuesta para este mismo dilema: «*en los campos de la observación, el azar no favorece sino a los espíritus preparados*». Y, a pesar de nuestra juventud, creo que nosotros estábamos preparados.

## 7. VACACIONES EN ROMA

Las calles y plazas de Roma acogen rincones donde arte, religión y ciencia conviven en absoluto equilibrio. Sólo quienes se adentran en la Ciudad Eterna con calma y sabiduría descubren en ella lugares colmados de recuerdos y leyendas que forman parte de la historia de la Astronomía. Si como Audrey Hepburn y Gregory Peck se deciden a pasar unas vacaciones en Roma, aquí van unos cuantos consejos que no encontrarán en las guías de viaje.

Roma es una ciudad grande y caótica donde el calzado cómodo y el transporte público serán nuestros mejores aliados. Precisamente nuestro periplo astronómico comienza cerca de uno de los puntos neurálgicos de la ciudad, la estación Termini, lugar de tránsito para todos aquellos viajeros que llegan o parten de Roma por ferrocarril, y único punto en el que se unen las dos líneas de metro que atraviesan el centro histórico. Próxima a Termini se encuentra la espaciosa Piazza della Repubblica, y en uno de sus extremos, frente a la parada de metro que lleva su nombre, se levanta la basílica de Santa María degli Angeli e dei Martiri, nuestra primera parada en este singular viaje.

Una sobria fachada de ladrillo nos da la bienvenida al templo (Figura 7.1). Pero no nos dejemos engañar por las apariencias, no en Roma. El aspecto exterior de esta basílica, como el de muchos otros edificios de la Ciudad Eterna, responde a un principio básico de lo que podríamos llamar (y pido perdón por el atrevimiento) termodinámica arquitectónica, esto es: desde hace siglos, los edificios de Roma no se crean ni se destruyen, simplemente se transforman. Así es. El sobrio muro de ladrillo frente a los que nos encontramos formó parte, hace diecisiete siglos, del centro público de ocio más grandes y lujoso del Imperio Romano: las Termas de Diocleciano<sup>1</sup>. Quizá nos cueste imaginarlo,

---

1. Las termas de Diocleciano, construidas en el siglo III de nuestra era por orden del emperador al que deben su nombre, eran un inmenso complejo arquitectónico que medía 356 por 316 metros de lado, treinta más que las famosas termas de Caracalla. En su interior alojaba piscinas, saunas y gimnasios, salas de lectura y bibliotecas, jardines y tiendas. Para hacernos una idea del tamaño de aquel edificio, pensemos que toda la Piazza della Repubblica ocupa hoy el mismo espacio de lo que antaño fuera una de las salas principales de las termas, el caldarium o piscina de agua caliente.





*Figura 7.1. Fachada principal de la basílica de Santa Maria degli Angeli e dei Martire.*

pero hubo un día en que estos viejos y deslucidos ladrillos sostuvieron placas de mármol y fueron la admiración de Occidente.

Pocos turistas saben que esta iglesia acoge en su interior dos tesoros, uno arquitectónico y otro científico. El primero se lo debemos al genial Miguel Ángel Buonarroti, quien, en el ocaso de su vida, diseñó el interior del templo (Figura 7.2). El segundo es un reloj de sol de 44 metros de longitud, un instrumento de gran belleza y singular precisión, conocido con el nombre de Meridiana de Bianchini.

Los relojes de sol presentan como rasgo común una superficie, plana o curvada, orientada al Sur, en cuyo centro se clava un gnomon. En griego esta palabra significa saeta, pues se trata de una varilla rectilínea de metal o cualquier otro material resistente que se encuentra clavado en el reloj. Al recibir la luz solar esta saeta proyecta una marca de sombra que se irá desplazando con el curso del Sol (es decir, conforme la Tierra gira sobre sí misma) a lo largo del día.



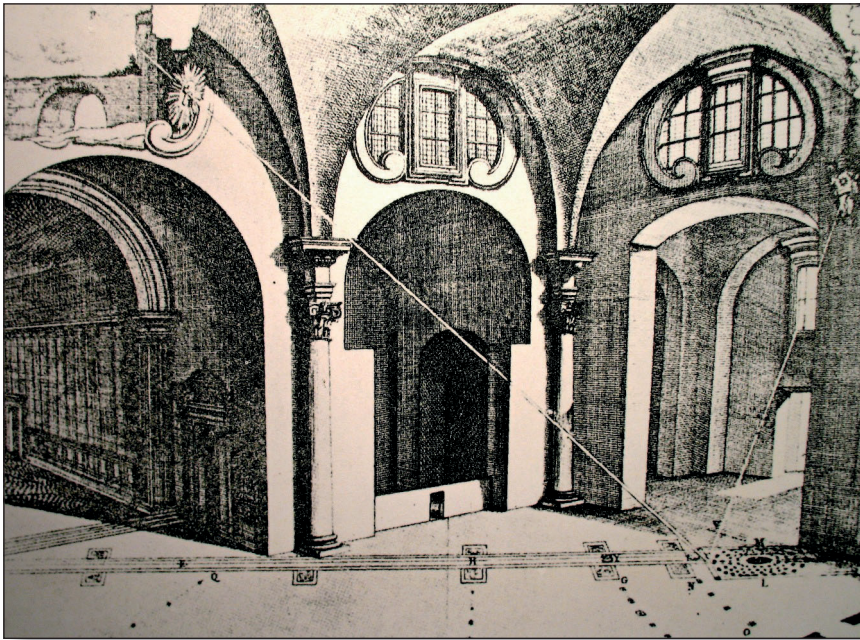
*Figura 7.2. Primeros diseños de Santa Maria degli Angeli, ejecutados por la mano de Miguel Ángel Buonarroti hacia 1560.*

Normalmente una secuencia de incisiones permite nombrar cada hora o cada conjunto de horas de una jornada. En el caso de las meridianas, este gnomon-saeta es sustituido por un gnomon-agujero, pues el efecto que se persigue no es el de proyectar una sombra, sino el permitir pasar la luz hasta el interior de una sala (en este caso el pavimento de una iglesia), y que sea el propio disco solar el que se proyecte sobre una regla especialmente graduada que recibe el nombre de meridiana.

La Meridiana de Bianchini (también conocida como meridiana clementina), es un reloj solar que consta de dos gnomones, uno Austral y otro Boreal (Figura 7.3). Su funcionamiento es muy sencillo. Desde un agujero-gnomon situado en la pared Sur de la iglesia (Figura 7.4), la luz penetra a mediodía en el edificio y proyecta el disco solar sobre una línea graduada de mármol y bronce (Figura 7.5), permitiendo conocer en ese preciso momento el día del año, la inclinación exacta del Astro Rey sobre el horizonte y su posición respecto al zodiaco. Por el contrario el gnomon Boreal es un instrumento nocturno, un agujero en la pared Norte de la iglesia que permite seguir desde su interior el movimiento de la estrella Polar, el «eje del mundo» alrededor del cual parecen girar todas las estrellas a lo largo de la noche.

La propuesta original de construcción de esta meridiana se remonta al papado de Inocencio XII, a finales del siglo XVII, pero la ejecución de la obra se mantuvo en suspenso hasta la proclamación del siguiente pontífice, Clemente XI, impulsor definitivo del proyecto. El nuevo Papa encargó la obra al

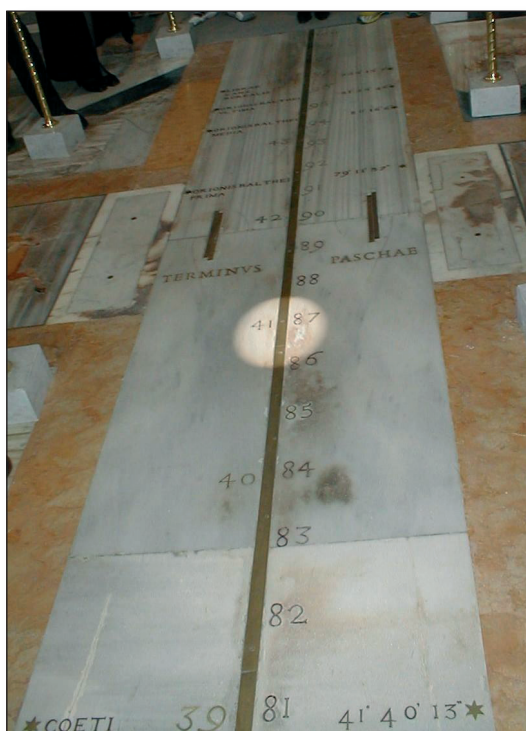




*Figura 7.3. Grabado del siglo XVIII en el que aparecen representados los dos gnomones: el Austral, a la derecha, que permite conocer el movimiento del Sol a lo largo del año; y el Boreal, a la izquierda, que permite observar el leve desplazamiento de la estrella Polar durante la noche.*



*Figura 7.4. Detalle del gnomon-orificio Austral en el momento de proyectar un haz de luz sobre la meridiana.*



*Figura 7.5. Disco solar sobre la meridiana de Bianchini.*

matemático, astrónomo y arqueólogo Francesco Bianchini, quien tomó como modelo la meridiana que en 1576 construyera en la iglesia de San Petronio de Bolonia el matemático dominico Ignazio Danti, instrumento que más tarde mejoraría el astrónomo Giovanni Domenico Cassini. En los siglos XVI, XVII y XVIII, varias catedrales e iglesias de Roma, Florencia, Bolonia y París, fueron importantes centros astronómicos. Aquellos lugares estaban a la vanguardia en el estudio minucioso y continuo de los fenómenos solares, y contaban con meridianas de gran precisión que servían para estimar la longitud del año, un dato necesario para la revisión del calendario juliano (ver cuadro de texto). Esta revisión, promulgada por Gregorio XIII en 1582, cumplió los objetivos civiles, pero no funcionó del todo bien para calcular con absoluta exactitud el día de Pascua, día que, según se estableció en el Concilio de Nicea del año 325, debe celebrarse con el domingo de plenilunio que coincide o sigue al equinoccio de primavera.

Si por algo destaca la meridiana de Bianchini sobre otras obras de su mismo género es por su decoración. El máximo responsable de esta tarea fue el artista Francesco Tedeschi, quien supo arropar magníficamente la línea o eje de bronce mediante un equilibrado conjunto de estrellas, constelaciones,

## LA REFORMA DEL CALENDARIO JULIANO

*Con el correr de la historia las pequeñas imperfecciones del llamado calendario juliano, promulgado por el emperador romano Julio César en el año 45 a. de C., provocaron un desajuste notorio respecto a los equinoccios, las estaciones y las fechas de algunas festividades religiosas cristianas. Este calendario suponía que el año tiene exactamente 365 días y un cuarto, y añadía un día extra cada cuatro años. Puesto que el año dura algo menos, esto condujo a un error de unos 3 días por cada 300 años. Esta situación comenzó a preocupar a la Iglesia a mediados del siglo XVI porque la Pascua de Resurrección, que es la fiesta principal del calendario cristiano, no cae en fecha fija como la Navidad, sino que es celebrada por los cristianos de Occidente en el primer domingo después de la luna llena que tiene lugar en el equinoccio de primavera o inmediatamente después. En la práctica, esto significa que puede caer entre el 22 de marzo y el 25 de abril, sin embargo, la Pascua del año 1572 se celebró en realidad el 11 de marzo, una situación que llevó al Papa Gregorio XIII a tener que promulgar una reforma del calendario juliano entonces vigente. Los trabajos del matemático jesuita Christopher Clavius y el astrónomo Lilio Ghiraldi permitieron al pontífice establecer la propuesta que en la actualidad se sigue con el nombre de calendario gregoriano. La Comisión de Gregorio XIII «puso los días en su sitio» omitiendo 3 años bisiestos cada 4 siglos. En el calendario juliano todos los años divisibles por 4 eran bisiestos. En el nuevo, los años divisibles por 100 pero no por 400 son bisiestos. Por tanto, 1800 y 1900 no fueron bisiestos, pero el 2000 lo fue y el 2400 lo será. Esto reduce el error a aproximadamente 1 día cada 4.000 años.*

*La reforma gregoriana, introducida en 1582 por la bula Lunario Novo, ajustó el calendario omitiendo 10 días. El día siguiente al jueves 4 de octubre de 1582, pasó a ser el viernes 15 de octubre. España, Portugal y parte de Italia respetaron la norma. De este modo, Santa Teresa de Ávila murió en la madrugada del día 4 al 15 de octubre de 1582. Pero en el resto de Europa la reforma provocó fuertes debates. En Grecia, el Patriarca de Constantinopla, que quería aplicar la reforma, fue destituido y encarcelado. Los protestantes no admitieron la reforma impuesta por un papa católico. Así, Suiza tuvo durante un tiempo dos tipos de calendario de fiestas (las católicas y las protestantes). Durante la Guerra de los Treinta Años, ciudades como Estrasburgo cambiaban de calendario cuando eran ocupadas por uno u otro ejército. En Inglaterra no se aplicó la reforma del calendario hasta 1751, por lo que en el momento de la adecuación fue necesario suprimir 11 días. Los propietarios de arrendamientos pretendían cobrar a sus inquilinos los 11 días que nunca existieron, lo que provocó enfrentamientos «a pedradas» en la calle. Las iglesias ortodoxas no aceptaron la reforma hasta 1923, aunque con modificaciones ligeramente diferentes a las nuestras. Japón esperó hasta 1873; y Rusia, finalmente, no cambió de calendario hasta después de la revolución de octubre de 1917.*



coordenadas y signos del zodiaco fundidos en bronce e incrustados en mármol de diferentes colores (Figura 7. 6).



*Figura 7.6. Grupo de escolares italianos admirando la meridiana.*

Una gran placa recuerda a quienes visitan la meridiana que el instrumento fue finalmente inaugurado el 6 de octubre de 1702. Hoy, junto a ella, justo debajo del gnomon Austral, podemos encontrar un panel con información referente a la hora en la que el disco solar se proyecta sobre ella. Planifiquen su visita para ser testigos de este acontecimiento. No olvidarán la experiencia.

## **ESTRELLAS EN EL AULA OCTÓGONA**

A escasos cien metros de Santa María degli Angeli se encuentra el Aula Octogona, un singular edificio que debe su nombre a la forma de la sala principal, espacio que presenta una amplia cúpula de unos 20 metros de diámetro. Actualmente acoge el Museo Nacional de las Termas, pero durante más de medio siglo, entre los años 1928 y 1983, alojó en su interior el planetario de Roma. En la década de los 80 se restauró el edificio, retirándose en el proceso la maquinaria del subsuelo y dejando al descubierto los elementos arquitectónicos originales de la época de Diocleciano. Por razones estéticas, se decidió conservar intacto el esqueleto de la vieja pantalla de proyección, un armazón metálico de color negro que refuerza la sensación de equilibrio que transmite la cúpula de viejo ladrillo (Figura 7.7).

Como mudo testigo del tiempo en que aquella sala octogonal estuvo consagrada a la divulgación y enseñanza de la Astronomía, podemos ver la palabra PLANETARIO esculpida en la fachada. En el dintel de la entrada principal podemos leer una curiosa inscripción: L AMOR CHE MOVE IL SOLE E L ATRE STELLE (El amor que mueve al Sol es la otra estrella). Un bello lema que sin duda los aficionados a la Astronomía sabrán apreciar.



*Figura 7.7. Interior de la Sala Octógona, antiguo planetario de Roma. Por razones estéticas aún hoy conserva parte del esqueleto de la pantalla de proyección.*

## **EL FANTASMA DE BRUNO**

Si abandonamos el viejo planetario con dirección a los Foros Imperiales, podremos subir en algún autobús que nos acerque hasta la amplia avenida Vittorio Emanuele. A la altura de la Piazza della Cancillería, ya cerca del río Tíber y a tan sólo un paseo del sabroso barrio del Trastevere, callejaremos hasta toparnos con nuestra siguiente parada, la plaza de Campo dei Fiori. La alegría que le otorga a este rincón de la ciudad su colorido mercado de flores, contrasta notablemente con la sobriedad de una imponente estatua de bronce negro con la efigie de uno de los personajes más controvertidos de la historia de la ciencia: Giordano Bruno (Figura 7.8).

Aunque con frecuencia se le presenta como un mártir de la ciencia, Bruno fue ante todo un filósofo y un teólogo. Partiendo de las obras de Nicolás de Cusa, el poeta latino Lucrecio y, sobre todo, Nicolás Copérnico, fundó una nueva corriente de pensamiento que podría calificarse de *copernicanismo místico*. Para Bruno, el valor del sistema heliocéntrico copernicano no reside en sus detalles astronómicos, sino en su dimensión de vehículo poético y metafórico



Figura 7.8. No ha llegado hasta nosotros ningún retrato de Giordano Bruno contemporáneo a su vida (1548-1600), por lo que la semejanza de la estatua que preside la plaza de Campo dei Fiori desde 1889 es probablemente nula. Con frecuencia se lo representa con hábito de monje (como en este caso) debido a que de joven profesó los votos de la orden de los Dominicos. A Bruno también se le conoce con el apelativo de «nolano», en alusión a su lugar de nacimiento, Nola, una barriada de Nápoles.

para una especulación filosófica mucho más amplia. La sustitución de la Tierra por el Sol en el centro del Mundo representa, según él, la restauración de la *antigua filosofía verdadera*, una forma hermética del neoplatonismo<sup>2</sup>.

2. El hermetismo es una secta que surgió en Egipto en los primeros siglos de la era cristiana. Supuestamente fundada por cierto Hermes Trimegisto (de aquí su nombre), al parecer tenía relación con las corrientes gnósticas de la misma época. Sus seguidores sostenían que la filosofía hermética había sido transmitida a través de Pitágoras, Platón y los filósofos griegos tardíos. Según las creencias herméticas, hay algo divino en todo hombre, y en consecuencia, éste puede llegar a comprender el universo.

Bruno creó impopularidad a su alrededor por falta de miedo y especial habilidad para atraer grandes auditorios con sus ideas y escritos. Habló sobre lo infinito del espacio, la habitabilidad de otros mundos, los movimientos de la Tierra y los demás planetas. Su clara oposición contra las creencias tradicionales, más en cuestiones de religión que de ciencia, le buscaron problemas por todas partes. Siendo de la orden de los dominicos, fue expulsado de la misma y perseguido. Escapó a Ginebra, de donde fue expulsado por los calvinistas, yendo a París, de donde lo expulsaron los aristotélicos. Anduvo de un lado para otro en Alemania y Reino Unido, impartiendo conferencias en Oxford en 1582. En sus obras más importantes, *La cena de las cenizas* (1584) y *Sobre el universo infinito y los mundos* (1584), reflexiona sobre el poder absoluto divino: «*Si Dios crea todo lo que puede hacer, el universo no puede ser finito*». Y si el universo es infinito, esto implica la existencia de otros sistemas solares, pues: «*No se glorifica (a Dios) en uno solo, sino en innumerables soles, no en una sola Tierra y un solo mundo, sino en miles de millares, más aún, en una infinidad (de mundos)*». Pero, si admitimos que existen una infinidad de mundos, ¿cómo dudar que algunos de estos estén habitados por seres «*similares o mejores a los hombres*»? En su opinión sólo hay una solución para este dilema: *la vida puebla el universo, y los astros, estrellas y planetas, han de estar dotados de alma*.

Su último viaje lo realiza a Venecia en 1592, donde es detenido por la Inquisición acusado de interesarse por el ocultismo, el hermetismo y, por supuesto, de cuestionar dogmas cristianos. Por ello pasará los siguientes ocho años de su vida en la prisión del castillo de Sant' Angelo en Roma. Durante el tiempo que dura el proceso se le ordena en varias ocasiones que abjure de sus herejías, que olvide sus convicciones sobre la pluralidad de mundos habitados y su filosofía neognóstica. Pero él es un hombre obstinado, y desafía a sus jueces: «*No hay duda de que tienen ustedes más miedo de ejecutar su condena que yo de aceptarla*».

Giordano Bruno murió en la hoguera el 17 de febrero de 1600. La estatua que hoy recuerda su memoria en Campo dei Fiori se levanta en el mismo lugar donde se ejecutó la sentencia.

## **POR LOS CAMPOS DE MARTE**

Si abandonamos Campo dei Fiori por Via dei Baullari, no tardaremos en llegar al corazón del Campo de Marte. En la Roma Imperial llamaban así al terreno que se extendía al norte de la muralla serviana (edificada por Servio Tulio, sexto rey de Roma), limitado al Sur por la colina del Capitolio y al Este por el monte Pincio. El resto estaba rodeado por el río Tíber, que en esta parte de la ciudad describe una gran curva. El nombre Campo de Marte se debe a que durante siglos existió allí un altar dedicado al dios de la guerra. Con el paso del



tiempo este espacio fue conquistado por las ampliaciones urbanísticas llevadas a cabo por Pompeyo, Julio César y Augusto. Edificios de cierta relevancia política y religiosa fueron surgiendo en esta parte de la ciudad: Teatro Marcelo, Ara Pacis, Mausoleo de Augusto (o de los Julios), el Estadio Domiciano (hoy Piazza Navonna) y el Panteón de Agripa. Dos mil años después, los restos de algunos de aquellos edificios se encuentran sepultados, aprisionados o confundidos entre las callejuelas del barrio medieval.

Para llegar hasta nuestro próximo destino debemos adentrarnos en el laberinto de callejuelas medievales que se extienden al Este de Piazza Navonna. En pocos minutos, como quien sale de las sombras a la luz, desembocaremos en la espaciosa Piazza della Rotonda, donde encontraremos el más bello y majestuoso de cuantos edificios existen en Roma: el Panteón (Figura 7.9). Miguel Ángel fue rotundo en su dictamen: «*Disegno angelico e non umano*». Una frase que no necesita traducción.

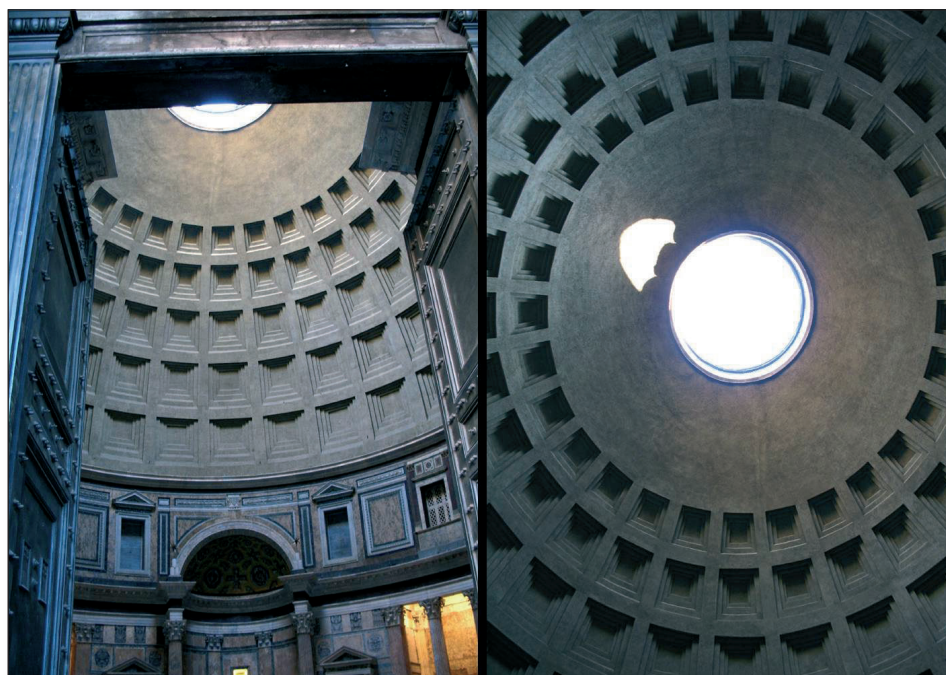
Debemos la construcción del Panteón al general y político romano Agripa (63-12 a de J C), que hacia el 27 a de C. decidió levantar un monumento dedicado al Sol, el «más santo» (en griego, pantheon) de las divinidades astrales. Debido a sucesivos incendios fue reconstruido un siglo después por orden de Adriano, cuyo nombre no aparece en las inscripciones debido al rechazo de este emperador a que su nombre figurase en las obras llevadas a cabo bajo su mandato. En el friso podemos leer M. AGRIPPA L. F. COS. TERTIUM. FECIT que quiere decir: *Marcus Agrippa, hijo de Lucius, tercer cónsul del tiempo, hizo esto.*



Figura 7.9. El Panteón, posiblemente el más bello de cuantos edificios podemos admirar en Roma.



Por estar consagrado a las divinidades planetarias, en especial al Sol, este templo alberga en su interior una cúpula de 43,30 metros de diámetro, exactamente igual que su altura, encerrando todo el edificio una esfera perfecta que es fiel reflejo de la bóveda celeste y el cosmos romano. En lo alto de la cúpula se encuentra una abertura de 9 metros de diámetro conocida popularmente como la «pupila del cíclope». Gracias a la presión que el aire del interior ejerce para salir, a través de este enorme orificio entra la luz pero difícilmente la lluvia (Figura 7.10).



*Figura 7.10. Entrada principal del panteón (izquierda) y la «pupila del cíclope» (derecha).*

En el edificio podemos contar un total de siete grandes nichos u hornacinas, espacios presumiblemente destinados a albergar las imágenes de las divinidades planetarias entonces reconocidas: Mercurio, Sol, Venus, Luna, Marte, Júpiter y Saturno. Más arriba, en una clara simbología relacionada con el mes lunar, los vanos que constituyen la cúpula se agrupan en cinco niveles con 28 unidades cada uno. Además, el edificio entero funciona como un gigantesco calendario, pues el haz de luz que penetra por la bóveda durante los solsticios y equinoccios iluminan con precisión diferentes rincones del edificio.

86 Contemplar la fachada del Panteón al atardecer, sentir los más de veinte siglos de historia que atesora, acariciar sus columnas, sentir la vibración de la

luz que atraviesa la gran pupila y se esparce por el edificio, comprobar que las gotas de lluvia no alcanza su interior... Sólo por vivir estas experiencias merece la pena viajar a Roma.

## LA SALA GALILEO

A espaldas del Panteón se encuentra la Piazza della Minerva, un rincón de la ciudad famoso por acoger a la pequeña elefanta esculpida por Gian Lorenzo Bernini para soportar sobre su grupa un pequeño obelisco egipcio (Figura 7.11). En un extremo de la plaza se encuentra la entrada a la Basílica de Santa María sopra Minerva, un ejemplo único de gótico medieval en Roma. La tradición cuenta que fue precisamente en esta iglesia, bajo un cielo raso pintado de azul y estrellas de oro (Figura 7.12), donde el 21 de julio de 1633 Galileo Galilei tuvo que arrodillarse para retractarse de su herejía heliocéntrica y abjurar de sus creencias (ver cuadro de texto).



*Figura 7.11. Junto a la entrada principal de la iglesia de Santa María sopra Minerva se levanta el elefante (en realidad elefanta) de Bernini, esculpido para sostener en su grupa el obelisco egipcio más pequeño de cuantos se conservan en Roma.*



*Figura 7.12. Según cuenta la leyenda, bajo este magnífico cielo estrellado Galileo tuvo que abjurar de sus creencias heliocéntricas en 1633.*



*Figura 7.13. Obelisco egipcio de 30 metros de altura erigido justo delante del palacio de Montecitorio, edificio que desde 1871 acoge la Cámara de los Diputados del estado italiano*



## LA ABJURACIÓN DE GALILEO

*«Yo, Galileo, hijo de Vincenzo Galilei de Florencia, de setenta años de edad, compareciendo personalmente en el juicio y arrodillado ante Vosotros, Eminentísimos y Reverendísimos Cardenales, Inquisidores generales contra la prevención herética en toda la República Cristiana, teniendo ante mis ojos los sacrosantos Evangelios que toco con mis propias manos, juro que siempre he creído, creo ahora y con la ayuda de Dios creeré en el futuro, todo aquello que considera, predica y enseña la Santa, Católica y Apostólica Iglesia. Más como por este Santo Oficio, tras haber sido jurídicamente intimado mediante precepto a que de cualquier modo debía abandonar totalmente la falsa opinión de que el Sol es el centro del universo y que no se mueve, y que la Tierra no es el centro del universo y que se mueve, y que no podía sostener, defender ni enseñar en modo alguno, ni de palabra ni por escrito, la mencionada falsa doctrina, y después de haberme sido notificado que la citada doctrina es contraria a las Sagradas Escrituras, por haber yo escrito y publicado un libro a favor suyo sin aportar solución alguna, he sido juzgado vehementemente como sospechoso de herejía, esto es, de haber creído y sostenido que el Sol es el centro del universo y que es inmóvil, y que la Tierra no es el centro y que se mueve. Por todo ello, queriendo apartar de la mente de Vuestras Eminencias y de todo fiel cristiano esta vehemente sospecha, justamente concebida a propósito mío, con sinceridad de corazón y no fingida fe abjuro, maldigo y aborrezco los mencionados errores y herejías, y en general cualquier otro error, herejía o secta contraria a la Santa Iglesia; y juro que en el futuro no oiré nunca más ni afirmaré, por escrito o de palabra, cosas por las cuales pueda ser objeto de semejantes sospechas; y si conociera algún hereje o a algún que fuera sospechoso de herejía lo denunciaré a este Santo Oficio, o ante el Inquisidor u Ordinario del lugar donde me halle. Juro también y prometo cumplir y observar enteramente todas las penitencias que me han sido o me serán impuestas por este Santo Oficio, y si contravengo alguna de estas promesas y juramentos, cosa que no quiera Dios, me someto a todas las penas y castigos que los sagrados cánones y otras constituciones generales y particulares imponen y promulgan contra semejantes delitos. Que Dios me ayude, y estos sus Santos Evangelios que toco con mis propias manos.*

*Yo, Galileo Galilei, he abjurado, jurado, prometido y me he obligado del modo que figura más arriba. En testimonio de la verdad he escrito la presente cédula de abjuración y la he recitado palabra por palabra en Roma, en el convento de Minerva, este 22 de junio de 1633. Yo, Galileo Galilei he abjurado y firmado con mi puño y letra».*



Pero la tradición no es del todo exacta. Ciertamente tanto la lectura de la sentencia como la abjuración tuvieron lugar en el convento de los dominicos de Santa María sopra Minerva, donde la Congregación del Santo Oficio de Roma (la famosa Inquisición) celebraba reuniones con frecuencia. Aquel complejo monumental fue reformado en el siglo XIX, y en una parte de lo que fuera el antiguo convento se instaló la actual Biblioteca del Congreso de los Diputados de Italia. La abjuración no tuvo lugar en la iglesia ni en el actual convento, sino en una estancia conocida como Sala Galileo, espacio que ahora pertenece a esta biblioteca y que se encuentra cerrada al público.

## **HOROLOGIUM DIVI AUGUSTI**

Nuestro paseo por el Campo de Marte nos conduce ahora hasta la Piazza di Montecitorio y sus alrededores, a tan sólo tres manzanas de distancia del Panteón. En esta ocasión nuestro objetivo será seguir el rastro de los pocos vestigios que han llegado hasta nuestros días del que fuera el más fastuoso reloj de sol que haya conocido Occidente, el llamado Horologium Divi Augusti.

Los datos históricos acerca de este reloj son escasos. El principal testimonio con el que contamos es el del político, historiador y naturalista romano Plinio el Viejo, quien en su obra *Historia Natural* (Lib. XXVI) relata la historia del gran reloj solar que el emperador Octaviano Augusto hizo construir en el año 9 a. de C para celebrar la conquista de Egipto. Decía Plinio:

*«Al obelisco del divino Augusto que está en el Campo de Marte, se le atribuye la admirable función de señalar la sombra proyectada por el sol determinando así la duración del día y de la noche. Una zona del pavimento estaba marcada con la altura del obelisco de tal forma que su sombra recorría el espacio marcado desde el mediodía, cuando es más pequeña, hasta la orilla del pavimento. Esta zona estaba marcada con letras y signos de bronce incrustado en el pavimento. Este dispositivo merece estudiarse, es una idea genial de Facundus Nuvius.»*

Aunque su emplazamiento exacto se ha perdido en la memoria, diversas excavaciones arqueológicas lo sitúan entre las actuales Piazza di San Lorenzo in Lucila, Piazza di Montecitorio y Via Campo Marzio. La parte que mejor se conserva es el obelisco egipcio de 30 metros de altura que servía de gnomon y que hoy se levanta justo delante del palacio de Montecitorio, edificio que desde 1871 acoge la Cámara de los Diputados del estado italiano (Figura 7.13). Gracias a los jeroglíficos que lo decoran, sabemos que el monumento fue inicialmente erigido en el templo de Heliópolis por el faraón Psammetichus II (594-589 a. de C.). Unos seis siglos después, en el año 30 a. de C.



el obelisco fue trasladado a Roma, donde, por orden de Augusto, fue erigido en el centro de un gran reloj de sol (*horologium* en latín).

Con el paso de los siglos esta parte de la ciudad cambió por completo su fisonomía. Se levantaron nuevos templos, se trazaron nuevas calles, la urbe se expandió desordenadamente y el reloj de sol de Augusto se perdió en la memoria. Cuenta la leyenda que en la Edad Media se conocían algunos restos dispersos del obelisco ocultos en los sótanos de algunas casas, donde eran estudiados por cabalistas y nigromantes que creían que los extraños dibujos con que estaban decorados ocultaban la sabiduría de Adán y Eva antes de ser expulsados del

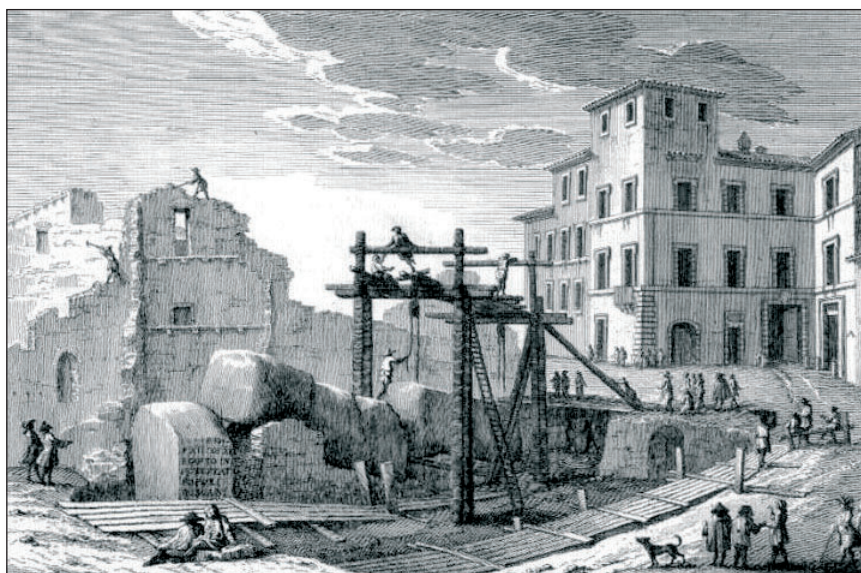
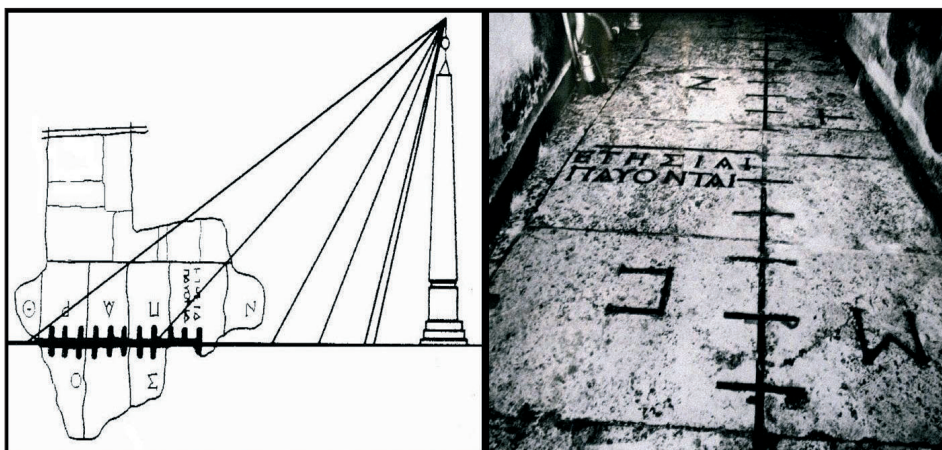


Figura 7.14. Trabajos de excavación y restauración del obelisco egipcio, según un grabado de 1748.

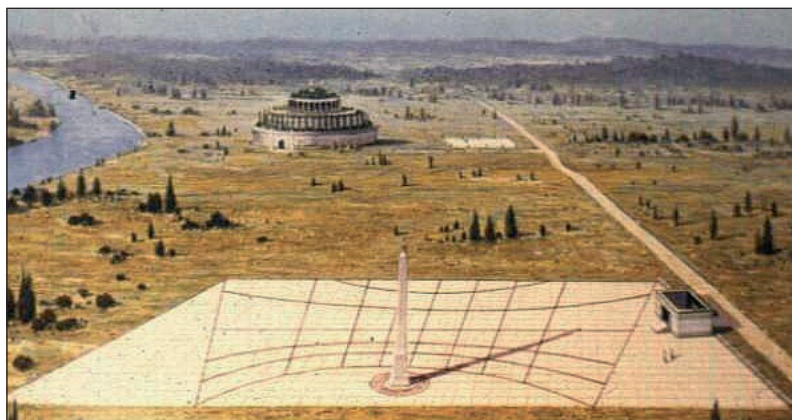
Paraíso. A finales del siglo XVI algunos restos salieron a la luz con motivo de nuevas reformas urbanísticas, y finalmente, en 1748, el Papa Benedicto XIV decidió financiar el caro y complejo proyecto de excavación y restauración del monumento egipcio (Figura 7.14). En 1789 el Papa Pío VI mandó trasladar el obelisco ya restaurado hasta la plaza de Montecitorio, donde hoy, tras más de 2.000 años de azarosa historia, continúa realizando la misma función para la cual fue trasladado hasta Roma. Así es. En el pavimento que hay justo delante de la puerta principal de la actual Cámara de los Diputados, podemos encontrar una moderna meridiana de cemento y bronce sobre la cual el obelisco proyecta su sombra a mediodía, señalando de esta forma la hora y el día del año.

Pero el obelisco no es la única huella que ha llegado hasta nosotros de aquel fastuoso monumento astronómico. Detrás del Palacio de Montecitorio



*Figura 7.15. Sólo ha llegado hasta nosotros una pequeña porción del pavimento original del Horologium de Augusto (derecha). Este fragmento se conserva en el subsuelo del número 48 de la calle Campo Marzio, junto al viejo café La Meridiana.*

se encuentra la calle que da nombre a todo el barrio medieval de Roma, Via Campo Marzio. A la altura del número 48 existe desde 1870 una cafetería cuyo nombre nos pone sobre aviso: La Meridiana. Allí, en el subsuelo del edificio, fuera de la vista de los curiosos, se encuentran los últimos restos del reloj de sol más grande del Imperio Romano. A muy pocos metros de este establecimiento, justo al final de la calle, se levanta la Basílica medieval de San Lorenzo in Lucila. En el interior de la iglesia podemos encontrar un pequeño panel expositor donde se cuenta la historia de la iglesia, panel que incluye una fotografía de los restos del reloj de sol que se esconden en el subsuelo del edificio colindante (Figura 7.15).



**92** *Figura 7.16. Aspecto que debía tener el reloj de sol de Augusto hacia el año 9 a. de C.*

Una serie de restos arqueológicos encontrados bajo la basílica demuestran que ésta se levantó en el siglo XII sobre los restos de una hacienda romana. Según una antigua tradición, la casa pertenecía a una mujer noble llamada Lucila, que entre los siglos IV y V vivió en el mismo lugar donde 400 años antes el emperador Augusto ordenó construir el *horologium*, es decir, un reloj que marcaba las horas del día gracias a la luz (Figura 7.16).

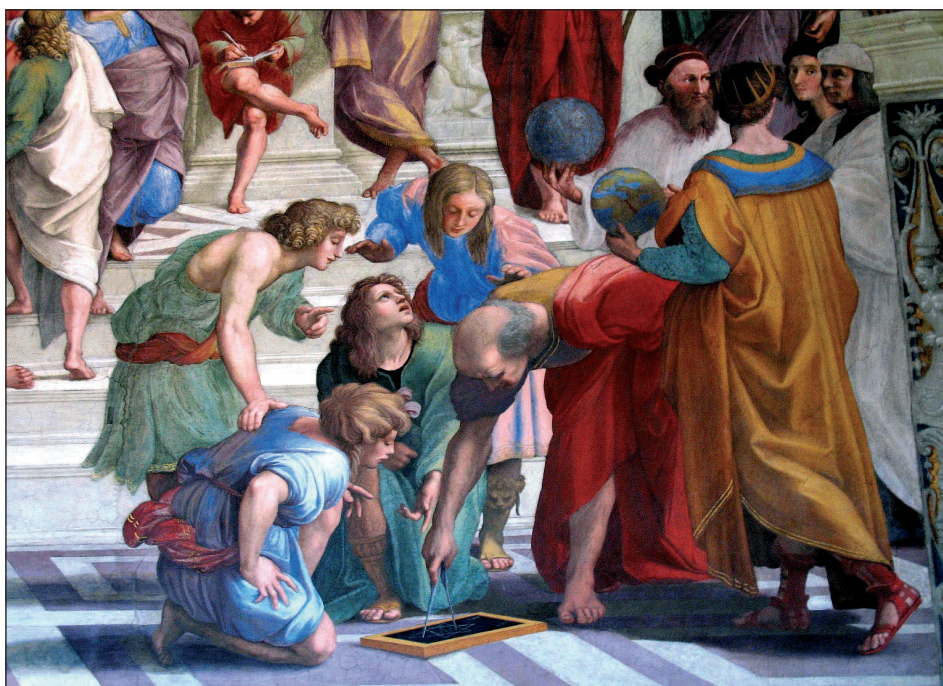
Los nombres latinos que incluyen la raíz *luci-* suelen estar relacionados con la luz, como es el caso de Lucila, que literalmente significa lucecita. Además, en la antigua Roma, la diosa Juno era considerada la principal divinidad protectora de la mujer. A ella está dedicado el mes de junio, y era venerada bajo diversos nombres, uno de los cuales era Lucina, la diosa protectora de las mujeres que dan a luz. Los nombres propios Lucila y Lucía no son más que la modificación fonética que con el paso del tiempo ha experimentado el nombre de una vieja diosa pagana. Infunde respeto pensar que de una u otra forma, bien a través de la piedra, bien incorporada a la tradición oral o las creencias religiosas, el recuerdo de aquel fastuoso reloj *de luz* ha desafiado a 2.000 años de historia... Un apasionante recuerdo que sólo está al alcance de cuantos pasean con calma y sabiduría por las calles y plazas del Campo de Marte.

## ASTRONOMÍA EN EL VATICANO

Aunque el Vaticano es un estado independiente, el hecho de que se encuentre a un paseo del corazón de Roma, nos obliga a tenerlo en cuenta a la hora de planear nuestro viaje. Para ir a la ciudad-estado desde Campo Marzio, la ruta más interesante es la que nos lleva por Via dei Coronari, una estrecha calle comercial situada al Norte de Piazza Navona. Coronari es la calle de los anticuarios, y en ella podemos encontrar todo tipo de rarezas (eso sí, al alcance de pocos bolsillos). Por ejemplo, en el número 95 podemos admirar el escaparate de la fabulosa *Moretti Collezioni*, tienda especializada en instrumentos científicos antiguos: telescopios, microscopios, cámaras fotográficas, teodolitos,... Todo un museo privado. La calle nos conduce cerca del Puente Sant' Angelo, el más bello y famoso de cuantos cruzan el Tíber y conducen al Vaticano.

Como ya hemos visto en páginas anteriores, con motivo de la reforma del calendario la Astronomía comenzó a florecer a la sombra de la residencia pontificia. Con tal objeto Gregorio XIII mandó edificar, en 1578, una torre en el corredor occidental del palacio Belvedere, principal sede de los Museos Vaticanos. En su interior se instaló una pequeña meridiana que sirvió al astrónomo Ignazio Danti para demostrar que el equinoccio de marzo ya no caía el 21 de marzo sino el 11. Esta torre, que actualmente forma parte de las estancias del Archivo Secreto, recibe el nombre de Torre dei Venti (torre de los vientos) porque en ella Danti instaló un complejo anemómetro para realizar





*Figura 7.17. Detalle de La Escuela de Atenas, pintado por Rafael cuando tan sólo contaba 26 años (1509-1510). Este fresco se encuentra en la llamada Estancia de la Signatura del Vaticano, y es considerado uno de los conjuntos más grandiosos de la pintura renacentista. En este detalle de la obra destacan cuatro personajes: Euclides, en primer plano, enseñando geometría a sus alumnos, Zoroastro, con un globo celeste en una mano y Ptolomeo (de espaldas) con un globo terráqueo. El personaje de gorra negra que nos mira directamente desde el extremo derecho del cuadro, es el autorretrato de Rafael.*

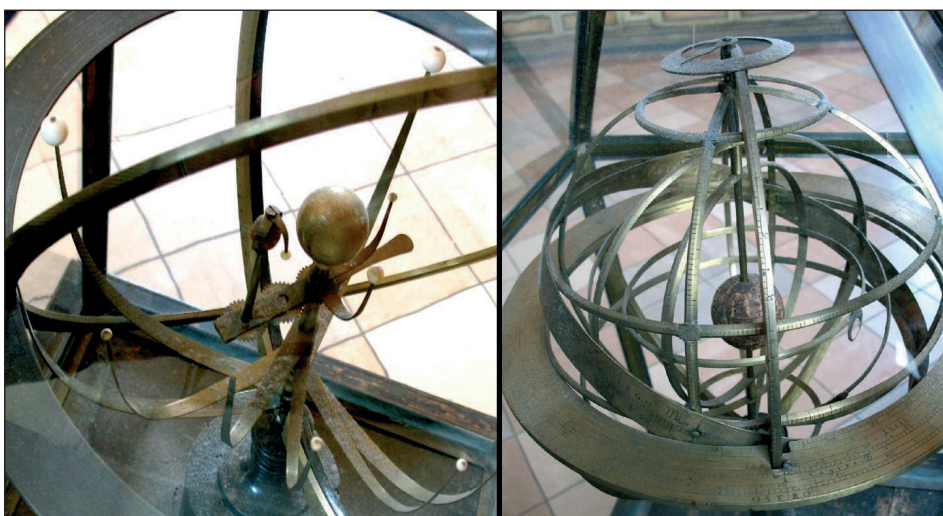
estudios sobre los cambios de intensidad y dirección que experimenta el viento con las estaciones del año. En 1891, el Papa León XIII fundó el Observatorio Vaticano (la Specola) y lo instaló en esta misma torre, donde permaneció hasta 1906, cuando fue trasladado a la Torre de los Jardines (lugar que hoy ocupa la dirección de la Radio Vaticana); y más tarde, en 1932, a Castel Gandolfo<sup>3</sup>, debido a la excesiva iluminación nocturna de la ciudad. En su nueva sede el observatorio alberga un museo con instrumentos astronómicos de distintas épocas, y acoge una importante colección de meteoritos que consta de unos 1.000 ejemplares.

Este glorioso pasado científico hace posible que podamos encontrar valiosas muestras artísticas relacionadas con la ciencia en general, y la astronomía

3. Castillo situado a unos 30 kilómetros de Roma que en el siglo XVIII fue restaurado por Urbano VIII y desde entonces es la residencia de verano de los pontífices.



*Figura 7.18. Mosaico con las fases de la Luna. Sala de la cruz griega, Museo Pío Clementino.*



*Figura 7.19. Instrumentos astronómicos en la galería de la Biblioteca Apostólica. El de la izquierda es un reloj-planetario y el de la derecha una esfera armilar.*



en particular, tanto en los Museos Vaticanos como en el interior de la Basílica de San Pedro. Así es. En el suelo o las paredes, entre esculturas, tapices y frescos (Figura 7.17), a la vista de miles de turistas, se esconde un pequeño tesoro que los amantes de la ciencia sabrán apreciar. Por ejemplo, en la Sala A del Museo Pío Clementino, en el suelo de la conocida como Sala de la Cruz Griega, podemos contemplar un magnífico mosaico azul con delicadas representaciones de eclipses de Sol y fases de la Luna (Figura 7.18). En la galería de la Biblioteca Apostólica, junto a las llamadas salas nobles del Archivo Secreto, podremos disfrutar de una magnífica colección de planisferios, esferas armilares y planetarios mecánicos. La mayoría de estos instrumentos se encuentran arrinconados en urnas sin ningún criterio o etiqueta (Figura 7.19). Y no, no se molesten. No existe ningún catálogo o postal que podamos llevarnos como recuerdo. Sin embargo, les recomiendo que curiosees en la pequeña tienda-librería del Archivo Secreto. Casi como un premio de consolación, allí (y sólo allí) podrán adquirir por unos pocos euros copias facsímile de algunos documentos que alberga el archivo, desde correspondencia privada de Galileo hasta parte del *Lunario Novo*, la bula con la que el Papa Gregorio XIII promulgó la reforma del calendario en 1582.

## LA IMPERFECCIÓN DE LOS CIELOS

Antes de la Revolución Científica la cosmología occidental se sustentaba sobre un único pilar: Aristóteles y su concepción del mundo. A pesar de que dejó tras de sí una obra considerable sobre física y astronomía, Aristóteles no era de los que se enfrascan en experimentos o pasan la noche en vela observando el firmamento. Al contrario, el filósofo de Estagira explora la naturaleza haciéndose preguntas, ordenando y describiendo... No es un hombre de acción. Observa fenómenos como el día y la noche, las fases de la Luna y los eclipses, y construye modelos mentales para explicarlos. Pero eso sí, sin invalidar nunca el principio estético del círculo y la esfera, las curvas perfectas. Hay que salvar las apariencias.

El universo aristotélico está dividido en dos. Por una parte, el mundo infralunar, por otra, el supralunar. Por debajo de la Luna, el mundo infralunar engloba a la Tierra y a su atmósfera. En esta región todo es incierto, cambiante e imprevisible. Las cosas y las personas cambian, aparecen y desaparecen, nacen y mueren. Todo fluye. El mundo supralunar es diametralmente opuesto. Allí todo es perfección, exactitud y estabilidad. Nada se crea ni se destruye. Los astros siempre siguen el mismo camino circular en el cielo, la Luna y el Sol son esferas perfectas e inmaculadas. Todo cuanto podemos observar en la bóveda celeste gira a nuestro alrededor cada día. El Mundo está constituido por una sucesión de esferas de cristal, unas dentro de otras, como una muñeca rusa.

Esta peculiar concepción del universo se impuso en la cultura occidental durante cerca de 2.000 años. Pero todo comenzó a cambiar una noche de noviembre de 1609, cuando Galileo orientó un pequeño anteojo astronómico<sup>4</sup> a la Luna y descubrió que:

*«...la superficie de la Luna y de los demás cuerpos celestes no es de hecho lisa, uniforme y de esfericidad exactísima, tal y como ha enseñado de ésta y de otros cuerpos celestes una numerosa cohorte de filósofos, sino que, por el contrario, es desigual, escabrosa y llena de cavidades y prominencias...»*

Las primeras observaciones astronómicas de Galileo con el telescopio demostraban que los cielos no son tan inmaculados y perfectos como dictaba la ortodoxia. Más bien al contrario, se parecen sospechosamente a la Tierra. La observación de montañas en la Luna y manchas en el Sol sirvieron para abrir un nuevo frente entre defensores y detractores de la cosmovisión geocéntrica aristotélica. La batalla será dura, y algunos de los episodios más memorables transcurrirán en Roma.

Nuestro periplo astronómico por las calles de la Ciudad Eterna llega a su fin, y el lugar elegido para la despedida se encuentra cerca de la estación Termini, el lugar donde comenzó nuestro viaje. A pocas manzanas, sobre el monte Esquilino (una de las siete legendarias colinas sobre las que se fundó Roma), se erige uno de los principales templos de la cristiandad: la basílica patriarcal de Santa María Maggiore<sup>5</sup>. A la izquierda del altar mayor se encuentra la capilla Paulina, que toma su nombre del Papa Paulo V, quien financió en parte su construcción y eligió ser enterrado en ella. Paulo V fue el papa que en 1616 ordenó amonestar a Galileo por su defensa pública del copernicanismo y la imperfección de los cielos. Curiosamente, en esta misma capilla podemos encontrar el monumento fúnebre de uno de sus predecesores, Clemente VIII, bajo cuyo papado murió en la hoguera Giordano Bruno. Los frescos de la capilla fueron realizados por Lodovico Cigoli, uno de los pintores italianos de más renombre del siglo XVII, quien solía decir que un buen amigo suyo había sido

---

4. El anteojo astronómico no fue bautizado con el nombre de telescopio hasta el 14 de abril de 1611. El nombre fue sugerido por el filólogo griego Demisani, en una cena organizada por el príncipe Federico Cesi en Roma para celebrar los descubrimientos de Galileo.

5. Santa Maria Maggiore, además de ser el mayor templo de Roma dedicado a la Virgen, pasa por ser la única iglesia del mundo donde de forma ininterrumpida se viene celebrando misa diariamente desde el siglo V.

su maestro en el arte de la perspectiva, y que debía su reputación como artista a sus consejos y aliento. Este amigo no era otro que Galileo Galilei<sup>6</sup>.

Cuando lleguen a la capilla, dirijan su mirada al techo y centren su atención en el fresco principal, la Ascension della Inmacolata. Si se fijan bien (prueben a utilizar el objetivo de una cámara de fotos con zoom), a los pies de la Virgen descubrirán una imagen que les será familiar: la misma Luna irregular y salpicada de cráteres que podemos admirar con ayuda de unos prismáticos; la misma imagen que inmortalizara Galileo en su opúsculo *Sidereus Nuncius* en 1610, la obra donde por vez primera describió cuanto había visto en el

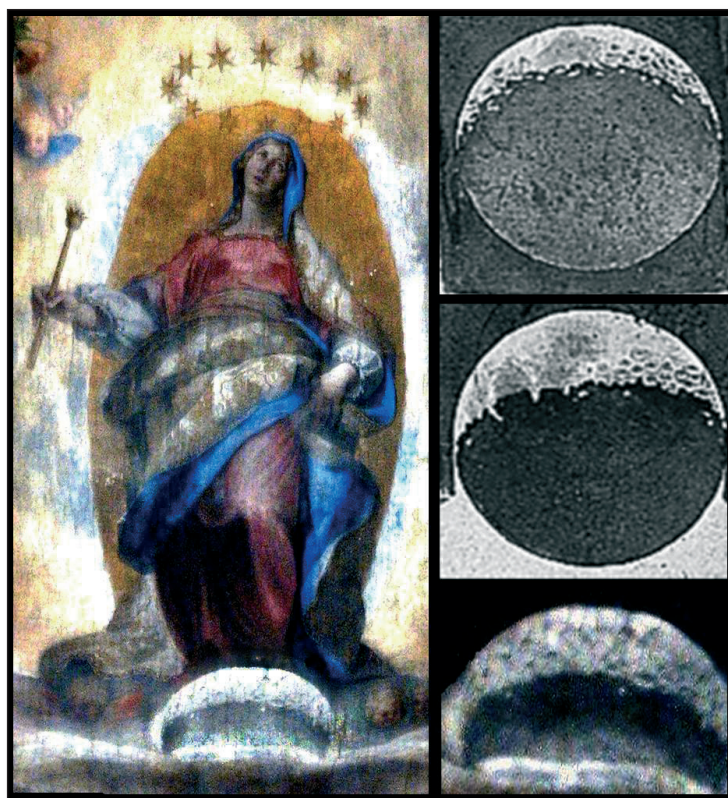
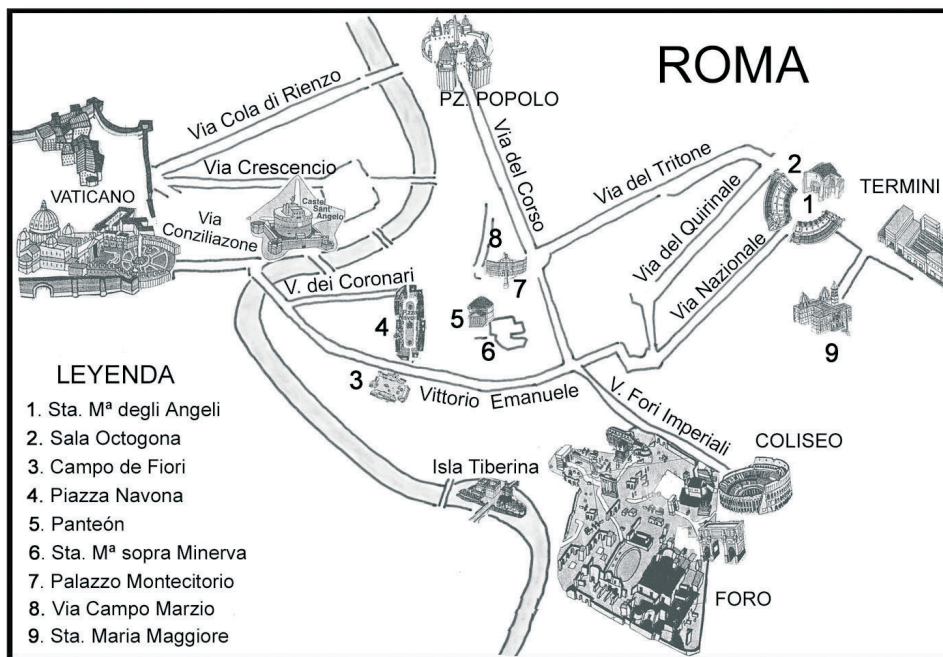


Figura 7.20. La Luna que «sostiene» a esta Inmacolata, de Ludovico Cigoli (1610-1612), es la primera representación artística con base científica de nuestro satélite. Podemos comparar una imagen aumentada de la misma (inferior derecha) con dos de los primeros dibujos realizados por Galileo hacia 1609.

6. Desde la infancia Galileo demostró tener una especial capacidad para la música (destacó como músico de laúd y llegó a ser un notable organista) y la pintura, su gran pasión. En septiembre de 1581 se matriculó en la Facultad de Artes de la Universidad de Pisa, pero las circunstancias familiares le obligaron a dejarla después de tres años y medio sin haber conseguido ningún título. De haber podido escoger una profesión, Galileo habría elegido convertirse en pintor.

cielo con ayuda un pequeño telescopio (Figura 7.20) Así es. Cigoli, amigo y admirador de Galileo, se encontraba inmerso en la ejecución de los frescos de la capilla en 1612, y no dudó en decorar el cielo con la primera representación artística con base científica (seguramente asesorado por el propio Galileo) de nuestro satélite.

En ocasiones resulta difícil creer en las casualidades históricas, pero ahí lo tienen, justo delante de sus ojos: los cuerpos de dos de los principales protectores de la ortodoxia aristotélica, Clemente VIII y Paulo V, yacen desde hace cuatrocientos años bajo una concepción del cielo que simboliza su derrota, una Luna creciente irregular y salpicada de cráteres de impacto que anuncia el amanecer de una nueva concepción del universo... El final de la armonía.







## II. DE HARMONICE

*«Resulta imprudente hoy en día, por parte de un hombre de ciencia, emplear la palabra filosofía, aún siendo natural en el título de una obra. Se tiene la seguridad de que será acogida con desconfianza por los científicos y, a lo mejor, con condescendencia por los filósofos. No tengo más que una excusa para emplearla, pero la creo legítima: el deber que se impone, hoy más que nunca, a los hombres de ciencia de considerar a su disciplina dentro del conjunto de la cultura moderna, para enriquecerla no sólo de conocimientos técnicos importantes, sino también de las ideas salidas de su ciencia, que puedan considerarse humanamente significativas. La ingenuidad misma de una visión nueva (la de la ciencia siempre lo es) puede a veces ilusionar con un nuevo día antiguos problemas».*

**Clos Saint-Jacques**

Prólogo a El Azar y la Necesidad, 1970



## 8. A LA DERIVA

Los asteroides son rocas con formas y tamaños dispares que vagan en penumbra por la difusa frontera orbital que separa Júpiter del Sol. Durante mucho tiempo creímos que representaban los restos de un planeta hecho añicos, pero hoy sabemos que en realidad son los escombros de un planeta destinado a no existir nunca. Testigos de excepción del nacimiento de planetas y satélites, guardan en su interior la huella de los procesos primordiales que dieron lugar al Sistema Solar.

A pesar de los 4.600 millones de años transcurridos desde el nacimiento del Sistema Solar, existen todavía numerosos planetesimales que no han consumado el proceso de acreción<sup>1</sup>. Estos escombros son lo que hoy llamamos asteroides o planetas menores, y el 80% se encuentran en el llamado cinturón principal, una vasta extensión de espacio localizado entre las órbitas de Marte y Júpiter. Sin embargo, no todos los asteroides se hallan confinados en esta región. En el interior de la órbita de Marte se existen otros tres grupos de especial interés, los llamados asteroides del tipo Amor, que en su periplo intersectan la órbita de Marte; y los asteroides de los tipos Apolo y Atenas, dos grupos con trayectorias tan próximas al Sol que en su camino cortan la órbita de la Tierra. Por último, mucho más lejos, en la misma órbita de Júpiter, se encuentran los llamados asteroides Troyanos. Esta distribución en poblaciones dispersas por distintas regiones del Sistema Solar responde a un complejo equilibrio al que los especialistas llaman resonancia orbital, un proceso que pone en relación las atracciones gravitatorias y los periodos orbitales de Marte y Júpiter con respecto al Sol.

### NAVEGAR ENTRE RESONANCIAS

Algunos cuerpos del Sistema Solar protagonizan curiosas coincidencias entre sus periodos orbitales. Por ejemplo, tres de los cuatro satélites galileanos

---

1. Proceso mediante el cual la masa de un cuerpo planetario aumenta por acumulación de materia, tanto en forma de gas como de pequeños cuerpos sólidos que colisionan y se adhieren a él.



de Júpiter, Ío, Europa y Ganímedes, tienen periodos de traslación que están en relación entre sí. Cuando Ganímedes, el más alejado de los tres, ha dado una vuelta completa alrededor del planeta, Europa ha dado exactamente dos e Ío cuatro. En casos como éste se dice que los periodos orbitales son conmensurables, es decir, mantienen todos ellos una relación de números enteros. Así, diremos que la relación orbital de Ganímedes con respecto a Ío es 1:4, la de Europa respecto a Ío es 1:2, y la de Ganímedes con respecto a Europa es 1:2. Este hecho garantiza que los tres cuerpos se encuentren repetidamente y cada poco tiempo en posiciones cercanas. Estas aproximaciones producen atracciones gravitatorias que se van sumando y deforman las órbitas (las vuelve más elípticas), desencadenando con ello diferentes procesos: deformaciones de la corteza y calentamiento por fricción mareal, variaciones en los periodos de rotación y traslación, o desplazamiento de un cuerpo de su órbita original.

Algo parecido sucede en el cinturón de asteroides aunque a mayor escala. Cualquier objeto que esté a una distancia de 2,5 unidades astronómicas (UA) del Sol se encontrará en resonancia 1:3 con respecto a Júpiter, situado a 5,2 UA del astro rey. La compleja relación entre distancia-gravedad-resonancia fue descubierta en 1867 cuando el astrónomo norteamericano Daniel Kirkwood halló zonas despobladas en la uniformidad del cinturón principal. Desde entonces estos huecos sin asteroides se conocen con el nombre de Lagunas de Kirkwood y se localizan en regiones con órbitas «prohibidas», es decir, en órbitas donde cualquier cuerpo que se encuentra en ellas termina siendo desplazado por efecto de la gravedad joviana hasta una posición más estable. Pero igual que unas zonas del espacio son «vacías», otras son «llenadas» por el mismo efecto. Así, las resonancias que se producen en diversos lugares de esta región tienden a agrupar los asteroides en lo que los expertos denominan familias: grupos de planetas menores que muestran características orbitales análogas (inclinación, periodo, etc.) y distancias medias parecidas respecto al Sol (Figura 8.1).

Pero, ¿cómo se explica la existencia de asteroides en el Sistema Solar interior, lejos del campo de influencia de Júpiter? Las sospechas en este caso apuntan a Marte como posible cómplice. Se han detectado algunos movimientos caóticos en aquellos cuerpos que siguen órbitas cercanas al planeta rojo y según algunos modelos, cualquier alteración en la trayectoria de uno de esos cuerpos podría favorecer su paso a una de las familias que orbitan cerca de la Tierra. En otras palabras, Marte podría estar comportándose como una especie de bomba gravitatoria capaz de trasladar asteroides desde el cinturón principal hasta el Sistema Solar interior.

También los asteroides Troyanos deben su ubicación al efecto de las resonancias. En este caso se trata de una relación 1:1, es decir, los asteroides poseen la misma distancia heliocéntrica y periodo de traslación que Júpiter. Describen

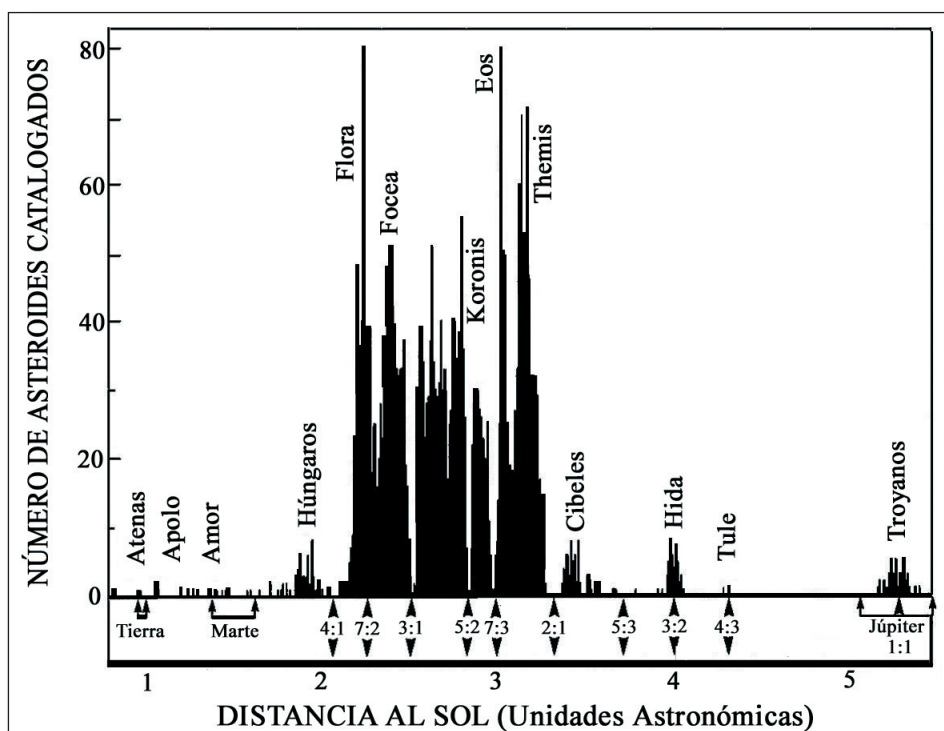


Figura 8.1. En este gráfico se aprecian las principales familias de asteroides en función de su número, distancia al Sol y resonancias que los agrupan. Las regiones donde el número de asteroides cae en picado (entre 2 y 4 UA principalmente) se corresponden con lagunas de Kirkwood, es decir, órbitas prohibidas debido a las resonancias. (Modificado de Pater y Lissauer, 2001)

sus órbitas en dos regiones a  $60^\circ$  por delante y por detrás del gigante gaseoso, ocupando dos lugares especialmente estables desde un punto de vista orbital, los llamados puntos lagrangianos L4 y L5, regiones del espacio donde la atracción gravitatoria del sistema Sol-Júpiter queda neutralizada (Figura 8.2 y 8.3).

## MUNDOS BINARIOS

El 28 de agosto de 1993 la nave Galileo se aproximó hasta una distancia de 2.400 kilómetros del asteroide 243 Ida, un miembro destacado de la familia Koronis del Cinturón Principal. El encuentro fue fugaz, apenas duró 6 horas, pero mantuvo entretenidos a los técnicos de la misión durante los siguientes 10 meses debido a un fallo en la antena principal de la nave. Como si de una novela de misterio por entregas se tratara, los investigadores fueron recibiendo la información (las pistas) con cuentagotas. Los descubrimientos se sucedían con la llegada de cada nuevo paquete de datos, el ritmo era lento, pero los resultados merecían la espera.

Figura 8.2. Puntos lagrangianos para el sistema Sol-Júpiter. Fueron descritos teóricamente por primera vez por el matemático francés Lagrange en 1772. En cada par de cuerpos ligados gravitatoriamente existen cinco de tales puntos. Sólo en los puntos  $L_4$  y  $L_5$  los efectos de la gravedad están tan equilibrados que un cuerpo puede permanecer allí indefinidamente. En ellos se localizan las dos familias de asteroides troyanos (Norton, 2002).

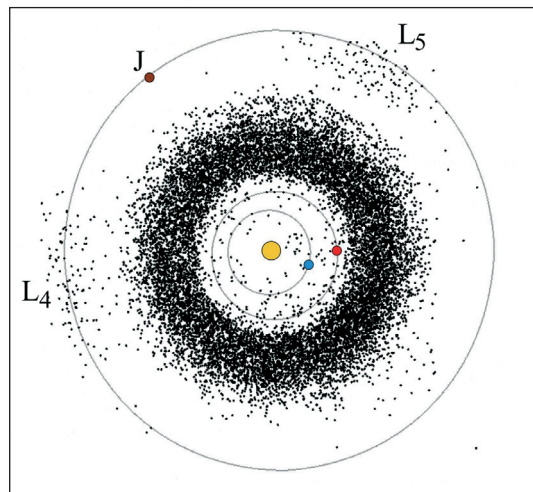
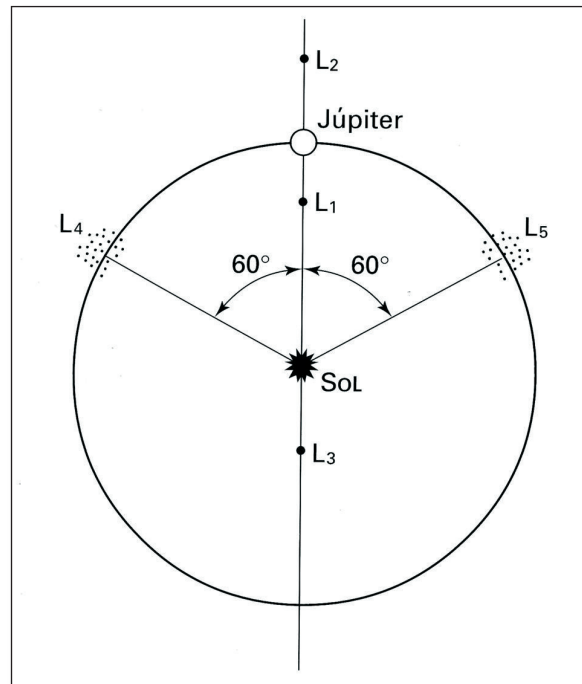


Figura 8.3. Proyección de la posición exacta en la que se encontraban aproximadamente 7.000 asteroides el 7 de marzo de 1997. En la imagen aparecen representados el Sol (punto amarillo) y las órbitas de la Tierra (punto azul), Marte (punto rojo) y Júpiter (punto marrón). También se observa cómo las dos familias de asteroides troyanos ocupan los puntos lagrangianos  $L_4$  y  $L_5$ . La mayoría de los asteroides se localiza en la región del espacio conocida como cinturón principal, entre las órbitas de Marte y Júpiter; sin embargo, podemos comprobar que algunos asteroides se encuentran en la parte interior del Sistema, muy próximos a la Tierra. Estos cuerpos forman las familias Apolo, Atenas y Amor (Modificado de Pater y Lissauer, 2001)

A mediados de febrero de 1994 la nave logró enviar una colección de imágenes en las que se apreciaba la existencia de un pequeño cuerpo (de aproximadamente 1,5 kilómetros de diámetro) en las proximidades de Ida. Datos adicionales obtenidos en marzo confirmaron que aquel objeto, ya catalogado como 1993(243)1, era en realidad un satélite del asteroide (Figura 8.4). En abril de 1994 los datos espectrales confirmaron que la pequeña Dactyl, nombre con que la bautizó la Unión Astronómica Internacional, no compartía con Ida la misma proporción de olivino y piroxeno, es decir, ambos cuerpos no mostraban evidencias de estar emparentados composicionalmente. Este descubrimiento reabrió el debate sobre el origen del satélite: ¿es Dactyl un fragmento desprendido de Ida o un pequeño asteroide atrapado tras un encuentro cercano? No tenemos datos concluyentes que nos permitan decantarnos por una u otra opción; aunque las últimas investigaciones y descubrimientos sobre mundos binarios parecen arrojar algo de luz sobre el problema.



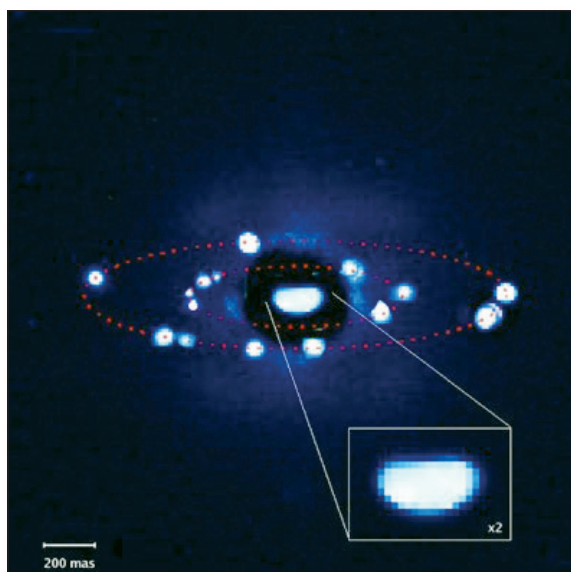
*Figura 8.4. Fotografía del asteroide 243 Ida y su pequeña luna Dactyl (ampliada en el recuadro). Ambos cuerpos distan entre sí unos 100 kilómetros, pero en esta imagen parecen mucho más próximos debido a la perspectiva con que fue tomada la fotografía: Dactyl está en primer plano, unos 80 kilómetros más cerca de la nave que Ida (JPL/NASA).*

## UNO, DOS, TRES... ¡OCHENTA!

El análisis de las curvas de luz registradas durante las ocultaciones estelares protagonizados por los asteroides 6 Hebe y 532 Herculina, en los años 1977 y 1978 respectivamente, parecían sugerir que estos cuerpos no vagan completamente solos por el espacio. Estos primeros resultados, ambiguos y nada concluyentes, fueron suficientes para que algunos investigadores se lanzaran en la década de los 70 a teorizar sobre la posible existencia de asteroides dobles. Una década después, en 1989, el equipo de Steven Ostro, investigador senior del Jet Propulsión Laboratory (JPL), empleó imágenes radar obtenidas desde el Observatorio de Arecibo (Puerto Rico) para obtener un modelo digital del asteroide 4769 Castalia. Ostro y sus colaboradores demostraron que Castalia es un asteroide formado por dos cuerpos débilmente unidos entre sí.

Entre el descubrimiento de los dos primeros asteroides en contacto y los dos primeros asteroides orbitándose el uno al otro tan sólo hubo que esperar cinco años. Al principio el ritmo de nuevos hallazgos fue lento, y en el intervalo comprendido entre los años 1994 y 2000 «apenas» se contabilizaron 13 nuevos asteroides dobles. Pero desde el año 2000 las técnicas y los métodos de observación han sido perfeccionados considerablemente, y ya son casi un centenar los posibles mundos binarios conocidos o en estudio. Sólo en 2005 se contabilizaron 23 nuevos hallazgos, algunos de ellos verdaderamente espectaculares, como el caso del sistema triple formado por 87 Sylvia y sus dos lunas S/2001(87)1 y S/2004(87)1 (Figura 8.5). Este vertiginoso ritmo de exploración y descubrimiento ha permitido estimar que el 16% de los asteroides mayores de 200 metros son, en realidad, sistemas binarios.

*Figura 8.5. Posiciones de los satélites S/2001(87)1 y S/2004(87)1 alrededor del asteroide 87 Sylvia, el primer sistema triple confirmado (agosto de 2005). El diámetro medio de Sylvia se estima en 143 kilómetros. Las lunas se encuentran a 1356 y 706 kilómetros de distancia, y sus diámetros son 18 y 7 kilómetros respectivamente. (Marchis et al., 2005).*





Entre los llamados NEOs (acrónimo de Near-Earth Objects) se ha podido confirmar que en todos los casos el par de objetos se encuentran muy próximos entre sí, lo que hace suponer que su origen está relacionado con las tensiones mareales que los cuerpos de mayor tamaño experimentan cada vez que se aproximan demasiado a un planeta. Pero al contrario de lo que sucede con los NEOs, entre los habitantes del Cinturón Principal no existe un patrón característico de distancia entre componentes o tamaños. Al contrario, en esta región del Sistema Solar todas las variedades parecen tener cabida. Algunos satélites, como Dactyl, son pequeños y se encuentran a decenas o cientos de kilómetros del cuerpo principal. Esto hace pensar que además de efectos mareales en su formación pueden haber jugado un importante papel los choques entre asteroides y los impactos en general. Así pues, Dactyl podría haberse formado como consecuencia de una colisión, o bien ser una luna capturada.

También se conocen posibles mundos binarios entre los asteroides Troyanos y los llamados objetos transneptunianos. Incluso en los arrabales del Sistema Solar se ha detectado un cuerpo bastante mayor que Plutón, objeto que por el momento es denominado con las siglas 2003 UB313 (extraoficialmente conocido como Xena), y que al parecer también se encuentra acompañado por un satélite de considerable tamaño.

## CLASIFICAR A DISTANCIA

Los asteroides reflejan una parte de la radiación que les llega procedente del Sol, lo que nos permite estudiar su cosmoquímica mediante el análisis de sus espectros de reflexión, es decir, comparando la relación entre el espectro de la luz que es reflejada por su superficie y el espectro solar en el infrarrojo cercano (entre 0,7 y 35  $\mu\text{m}$ ). A pesar de que la espectroscopía remota sólo examina la capa polvorienta más externa de un asteroide (lo que no siempre representa el material que hay debajo), numerosos análisis han permitido clasificar los cuerpos del cinturón principal en una quincena de clases taxonómicas en función de la composición. Cada clase se identifica con una letra (S, C, M, D, F, P, G, E, B, T, A, V, Q, y R), y de las hoy aceptadas, las más abundantes son sólo cinco: S, C, M, D y V.

El tipo espectral S, muy frecuente en la parte interna del cinturón principal, se corresponde con rocas silicatadas (olivinos y piroxenos) mezcladas con metales (hierro y níquel). A la clase C pertenecen más de la mitad de los asteroides estudiados, y se asocia con asteroides muy primitivos ricos en carbono y moléculas de agua. Los planetesimales de tipo M son cuerpos ricos en metales, posiblemente procedentes de los núcleos de asteroides diferenciados. La clase D se caracteriza por la presencia de carbono y materiales volátiles

helados; y la V, a la que pertenece Vesta y toda su familia, se corresponde con rocas basálticas formadas por actividad magmática (Ver tabla).

A su vez, esta errática sopa de letras puede clasificarse en tres superclases: primitiva, metamórfica e ígnea. Los asteroides primitivos abarcan las clases C, D y P. Dominan la parte externa del cinturón (la más alejada del Sol), son ricos en carbono y agua y representan el material residual inalterado de la formación del Sistema Solar. Los asteroides metamórficos están formados por las clases F, G, B y T, y presentan su máxima frecuencia en la región central del cinturón. Poseen menos compuestos volátiles y (en ellos) escasea en agua, propiedades que apuntan hacia algún proceso de calentamiento que transformó los asteroides primitivos en metamórficos. Por último tendríamos los asteroides ígneos, en su mayoría ubicados en la zona interior del cinturón (la más próxima al Sol). Éstos debieron sufrir en algún momento de su historia un fuerte calentamiento que llegó a fundirlos parcialmente.

Esta ordenada distribución según composiciones pone en evidencia la existencia de actividad geológica pasada, así como un fuerte gradiente de temperatura capaz de alterar su composición inicial. Sin embargo, los asteroides son cuerpos demasiado pequeños como para retener durante mucho tiempo tanto el calor primordial de formación como el proporcionado por los radioisótopos de vida media larga. ¿Cuál pudo ser entonces la fuente de energía que provocó un incremento de su temperatura?

ASTEROIDES DEL CINTURÓN PRINCIPAL			
FAMILIA	Nº MIEMBROS	CLASE DOMINANTE	DISTANCIA (UA)
Themis	1	C	3,13
Eos	2	U, S	3,03
Konoris	3	S, U	2,87
Maria	4	S	2,25
Nysa/Hertha	24	E, U	2,40
Ceres	67	S	2,70
Undina	106	C	3,20
Budrosa	124	U	2,90
Leto	126	S	2,80
Lydia	130	U	2,70
Concordia	132	C	2,70
Alexandra	138	¿C?	2,70
Eunimia	140	S	2,65

## TRES FORMAS DE COCINAR UN ASTEROIDE

Muchos asteroides se encuentran sometidos a un continuo proceso de desgaste y pulverización como consecuencia de pequeños impactos y la interacción con el campo gravitatorio de Júpiter y Marte. Estos procesos, lentos pero irreversibles, han ido despojando al cinturón principal de buena parte de su masa original. Sin embargo, una pequeña parte de esta masa no está totalmente perdida, pues se encuentra en las salas de los principales museos de historia natural de todo el mundo. Son los meteoritos. Se estima que cada año caen sobre la Tierra más de diez mil toneladas de material extraterrestre (algunos autores hablan de cien mil, un orden de magnitud mayor), de las cuales sólo se logran rescatar una minúscula porción. Comparando la composición de un meteorito con los espectros de los planetas menores hasta ahora registrados, podemos llegar a determinar la familia de asteroides de la que procede, cuál es el posible cuerpo progenitor, su composición química e incluso construir modelos que expliquen las causas del intenso calentamiento que en ellos tuvo lugar.

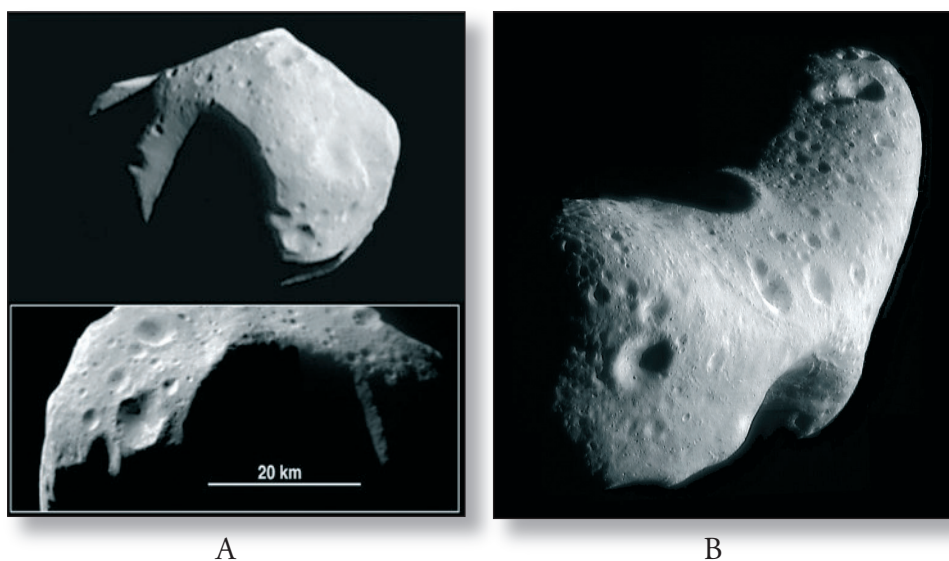
El primer modelo lo propuso hace 50 años el químico norteamericano Harold Urey. En su opinión, la desintegración radiactiva del isótopo aluminio 26 ( $^{26}\text{Al}$ ) podría haber calentado los asteroides. El  $^{26}\text{Al}$  es inestable y se desintegra hasta transformarse en el isótopo magnesio 26 ( $^{26}\text{Mg}$ ) liberando energía en el proceso. Su vida media es de apenas 730.000 años, miles de veces más corta que las semividas de los radioisótopos de larga duración (potasio 40, uranio 235 y 238, etc.) que desde hace miles de millones de años contribuyen a mantener caliente nuestro planeta. Y puesto que se desintegra tan pronto, cantidades reducidas de este isótopo pueden aumentar notablemente la temperatura de los cuerpos más pequeños antes de que el calor se pierda en el espacio. Sin embargo, el análisis de las concentraciones en  $^{26}\text{Mg}$  presentes en los meteoritos, junto con los modelos térmicos de su evolución, muestran que el  $^{26}\text{Al}$  habría aumentado la temperatura del interior de los asteroides hasta aproximadamente 1.100 grados, temperatura a la que se funden los metales y los sulfuros, pero que es insuficiente para fundir los silicatos. Así pues, el  $^{26}\text{Al}$  por sí sólo no es suficiente para llegar a fundir un asteroide.

Los investigadores Alexander Shukolyukov y Gunter Lugmair, de la Universidad de California, han propuesto otra posible fuente de calor: el radioisótopo de hierro 60 ( $^{60}\text{Fe}$ ) que se desintegra a níquel 60 ( $^{60}\text{Ni}$ ) y cuenta con una vida media de un millón y medio de años. Sin embargo, los análisis de los meteoritos demuestran que la proporción relativa inicial de  $^{60}\text{Fe}$  fue demasiado pequeña como para calentar los asteroides por encima de los 200 grados. En otras palabras, la desintegración conjunta de  $^{26}\text{Al}$  y  $^{60}\text{Fe}$  tampoco es suficiente para explicar esta fusión.

Un mecanismo alternativo de calentamiento pudo ser la inducción electromagnética. Cuando el joven Sol se encontraba en la fase conocida como T-Tauri, emitía un fuerte viento solar ionizado con un intenso campo magnético asociado. De haberse topado este viento con asteroides conductores de la electricidad habría provocado en ellos corrientes generadoras de calor. Aunque sugerente, esta idea cuenta con pocos seguidores debido a sus incertidumbres. Por un lado, no todos los asteroides de gran tamaño que se encuentran a una misma distancia del Sol están diferenciados. Por otro, las estrellas nacientes con vientos de tipo T-Tauri tienden a eyectarlos hacia los polos y no hacia los discos ecuatoriales de acreción que las rodean, y que es donde se localizan los asteroides.

El último modelo de calentamiento propuesto es el denominado colisional (o por colisiones) y que, como su propio nombre indica, defiende el calentamiento de los asteroides por la acción de repetidos impactos; un sugerente modelo que durante años contó con dos serias objeciones. En primer lugar, un impacto sólo aumenta la temperatura global de un cuerpo del tamaño de un asteroide en unos pocos grados, y en segundo, los asteroides deben enfriarse muy rápidamente tras un impacto debido a su pequeño tamaño. Además, un impacto típico genera un volumen muy pequeño de roca fundida en comparación con la gran cantidad de escombros que produce. Durante años estas sólidas objeciones parecían determinantes porque presuponían que los asteroides son cuerpos telúricos, es decir, que cuentan con una composición y estructura semejante a la terrestre: silicatos muy cohesionados y con escasa porosidad. Sin embargo, las observaciones realizadas por la misión NEAR-Shoemaker (de Near Earth Asteroid Rendezvous —encuentro con los asteroides próximos a la Tierra— y Shoemaker como póstumo homenaje al geólogo planetario Eugene Shoemaker, fallecido en 1997 en un accidente de tráfico), no parecen confirmar este supuesto.

Cuando NEAR se aproximó al asteroide Matilde en 1997, las medidas de la atracción gravitatoria que experimentó la nave evidenciaron que su densidad era sorprendentemente baja. De este resultado se concluyó que Matilde consiste en una pila de escombros con una porosidad del 50 % (es decir, la mitad del asteroide está vacío) con brechas, fracturas y huecos en su estructura (Figura 8.6). Este hallazgo puso en entredicho la idea de que los asteroides, como los planetas, sean cuerpos cohesionados, y ha resucitado la idea del calentamiento por impactos: según los modelos informáticos las colisiones entre cuerpos rocosos de gran porosidad sí pueden llegar a desprender calor suficiente como para fundir una ingente cantidad de roca. Si se demuestra su validez, la teoría del calentamiento colisional podría resolver esta antigua controversia y transformar nuestra visión de la historia primigenia del Sistema Solar.



*Figura 8.6. Asteroides Matilde (A) y Eros (B) fotografiados por la sonda NEAR-Shoemaker en 1997 y 2000 respectivamente. Eros, descubierto en 1898, fue el primer asteroide que alcanzó fama por su trayectoria de aproximación a la Tierra. Su descubrimiento permitió a los astrónomos verificar las estimaciones que hasta entonces se manejaban sobre magnitudes astronómicas (brillo aparente de un objeto estelar) y calcular una estimación más precisa para el valor de la Unidad Astronómica (distancia media de la Tierra al Sol, establecida en 150 millones de kilómetros). Matilde cuenta con una porosidad del 50%, es decir, la mitad del asteroide es espacio vacío (Imágenes JPL/NASA).*

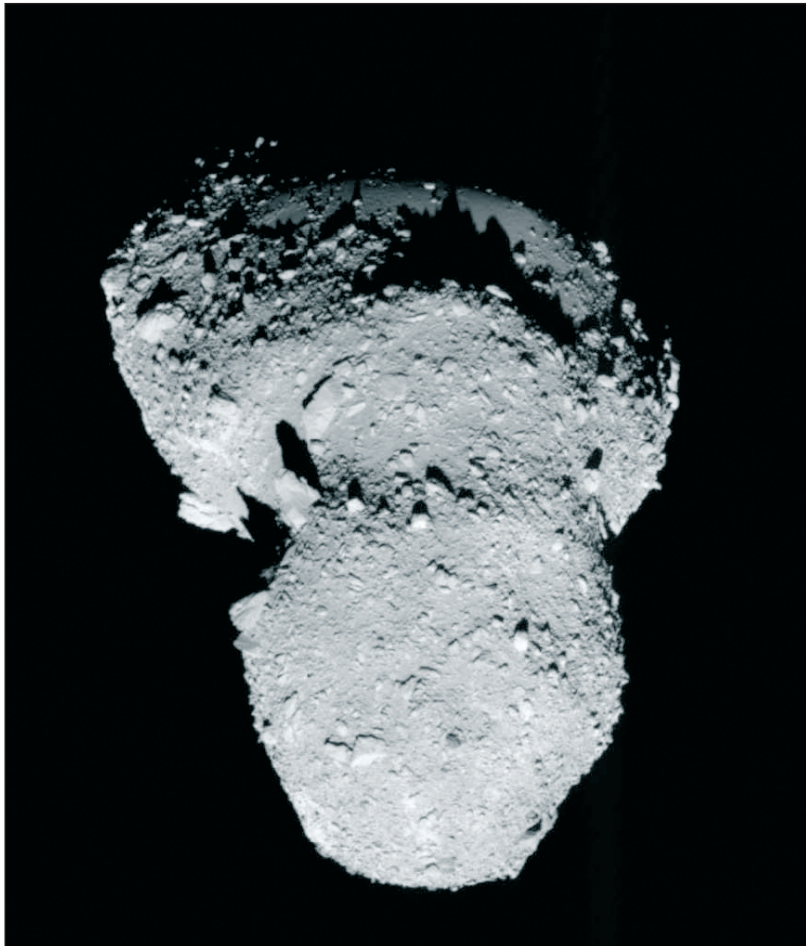
## PROMESA DE FUTURO

El 12 de septiembre de 2005, después de dos años de navegación automática mediante motores iónicos, la pequeña nave *Hayabusa* (halcón en japonés) de la Agencia Espacial Japonesa JAXA, se aproximó hasta el asteroide 25143 Itokawa. (Figura 8.7). Hasta el 4 de noviembre la nave realizó una excelente labor de cartografía óptica, infrarroja altimetría láser y espectroscopia de rayos X. Toda esta información ha permitido a los técnicos establecer con precisión la forma del asteroide, su gravedad (del orden de 10 nanoG, algo así como una mil millonésima parte del terrestre), su masa y densidad (mucho menor de la esperada para un asteroide de este tipo, debido a una estructura interna porosa).

A mediados de noviembre la misión sufrió numerosos problemas técnicos. A trancas y barrancas, después de varios acercamientos y algunos aparatosos accidentes, parece que la nave *Hayabusa* ha cumplido parcialmente su principal objetivo: recoger *in situ* las primeras muestras de la superficie de un asteroide. Está previsto que el halcón regrese a la Tierra en junio de 2007, trayendo consigo su valiosa presa. Algunos investigadores creen que esta accidentada aventura



podría poner fin o, al menos, un punto y aparte a la apasionante controversia sobre el calentamiento asteroidal; pero hasta que no se abra la cápsula que supuestamente guarda las esquirlas arrancadas a Itokawa, no sabremos si esta misión ha sido algo más que un éxito de la maquinaria tecnológica nipona.



*Figura 8.7. Vista «frontal» del asteroide Itokawa captada por la nave japonesa Hayabusa en octubre de 2005. Como se puede apreciar, se trata de un gran conglomerado rocoso apenas cohesionado por una matriz de hielo y rocas de menor tamaño. Al ver estas imágenes, una duda asalta a los geólogos: ¿Dónde están sus cráteres de impacto? (ISAS/JAXA).*

## 9. METEORITOS EN EL DESIERTO

Los meteoritos constituyen la fuente de material extraterrestre más abundante y accesible con que cuentan los investigadores. La recuperación sistemática de este material de incalculable valor científico se viene realizando desde 1966 a través de costosas expediciones a la Antártida. Sin embargo, el descubrimiento de extensos campos de meteoritos en los cálidos desiertos del Norte de África, Australia, Nuevo México y la Península Arábiga, ha dado un nuevo impulso a las expediciones científicas patrocinadas por coleccionistas y entidades privadas.

Diariamente llegan a la Tierra unas 1.000 toneladas de material extraterrestre. La mayor parte de estos fragmentos son tan pequeños que arden en cenizas al contacto con la atmósfera, dejando esas estelas que nos son familiares y que llamamos estrellas fugaces. Sin embargo, la rocalla de mayor tamaño resiste el paso por la atmósfera sin desintegrarse. Las piedras que alcanzan la superficie reciben el nombre de meteoritos y, aunque pueden caer en cualquier parte del planeta, a la hora de recuperarlas los investigadores no las buscan en cualquier sitio. Los mejores lugares para acometer esta difícil tarea son los desiertos fríos, como la Antártida y Groenlandia; y los cálidos, especialmente el Norte de África y Oriente Medio. En estas regiones las extremas temperaturas y los bajos niveles de humedad ambiental favorecen que las muestras rocosas se preserven de la destrucción mecánica y la alteración química. Además, puesto que los meteoritos suelen presentar tonalidades oscuras debido a los procesos de fusión superficial que experimentan al atravesar la atmósfera, son mucho más fáciles de localizar en estos ambientes desérticos, donde la gama de colores se concentra en el blanco de la sal o el hielo, y el amarillo-ocre característico de los suelos carentes de vegetación y pobres en materia orgánica.

Durante las pasadas décadas la búsqueda sistemática de meteoritos se centró exclusivamente en la Antártida, donde numerosas expediciones han logrado recuperar desde el año 1966 más de 4.000 kilos de material extraterrestre. Entre los miles de ejemplares rescatados del hielo se cuentan trece valiosos meteoritos



*Figura 9.1. Un meteorito recién descubierto en las arenas del desierto del Sahara. Como se puede observar, su color negro destaca notablemente con respecto a los ocre y amarillos propios de las zonas áridas secas.*

del tipo SNC de origen marciano (iniciales de los lugares donde se hallaron los primeros ejemplares: Shergotty en India, Nacla en Egipto y Chassigny en Francia) y que hasta la fecha (primavera de 2005) suman un total de 26 Kg de muestras procedentes de aquel planeta<sup>1</sup>. Pero estas rocas directamente venidas de Marte no les salen totalmente gratis a los investigadores, pues pocos son los países que cuentan con los medios técnicos y humanos capaces de abordar la arriesgada tarea de buscar meteoritos en uno de los ambientes más inhóspitos del planeta. El hallazgo en 1996 de un meteorito SNC en el corazón de Libia hizo que la comunidad científica internacional empezara a prestar atención a un territorio donde los cazadores de fósiles y meteoritos campaban a sus anchas desde hacía tiempo: el desierto del Sahara.

Los desiertos del Sahara y Omán son desde hace una década las dos regiones más productivas en lo que al hallazgo de meteoritos se refiere. El número de muestras recuperadas en los últimos seis años supera el medio millar, y entre ellas se cuentan 7 valiosos meteoritos de procedencia lunar (de los que solo se han recuperado 30 en todo el mundo); así como 38 ejemplares de meteorito SNC que suman un total de 27,5 Kg. Las cifras hablan por sí mismas y el mensaje es claro: cualquier institución científica interesada en engrosar sus colecciones con un «cacho» de Marte o la Luna, sólo tiene que darse un paseo por el desierto más próximo y probar suerte. Este singular reclamo ha favorecido la proliferación de empresas que organizan expediciones científicas financiadas por centros de investigación europeos en colaboración con universidades de países del Norte de África y Oriente Medio. Pero en este campo los llamados *meteorite-hunter* privados también tienen mucho que decir, especialmente Carine Bidaut y Bruno Fectay, descubridores de 6 ejemplares del tipo SNC en el Atlas marroquí, un registro difícil de superar.

---

<sup>1</sup>. Sabemos que los meteoritos SNC proceden de Marte porque las concentraciones de sus elementos ligeros encajan con los análisis que en los años 70 las naves Viking 1 y Viking 2 realizaron del suelo de aquel planeta. Las cantidades de gases nobles medidas en pequeñas inclusiones (burbujas) de estos meteoritos son también similares a las de la atmósfera marciana.

La mayoría de los hallazgos se han realizado en la austera región de *Al Jufrah*, en pleno desierto de Libia; en la extensa llanura desértica de *Sayh al Uhaymir*, en Omán, y en algún lugar sin especificar del Atlas marroquí. Aunque la buena práctica profesional exige que cada meteorito descubierto sea posicionado mediante GPS, lo cierto es que las coordenadas exactas de los lugares de especial interés científico son mantenidas en secreto por investigadores y *cazadores* con el fin de evitar el expolio (y de paso asegurarse suculentos beneficios). Esto es exactamente lo que sucede en el Atlas marroquí. La zona de hallazgos más productiva es precisamente el coto privado de Bidaut y Fectay, en algún lugar fronterizo sin determinar entre Marruecos y Argelia. Estiman que en esta región puede haber hasta 1.000 ejemplares esperando a ser recuperados, preferiblemente por alguna institución que financie la expedición y garantice tanto su preservación como el posterior estudio de las piezas recuperadas.

METEORITOS MARCIANOS SNC HALLADOS EN EL DESIERTO ENTRE LOS AÑOS 1996 Y 2004			
NOMBRE	PAÍS	FECHA	MASA (Kg)
<b>Dar al Gani</b> 476, 489, 735, 670, 876, 975 y 1037	Libia	Mayo 1996- Agosto 1999	10,4
<b>Northwest Africa</b> 2737, 480, 1460, 817, 1669, 1950, 856, 1068, 1110, 1775, 2373 y 1195.	Marruecos	Agosto 2000 – Agosto 2004	2,8
<b>Sayh al Uhaymir</b> 005, 008, 051, 094, 060, 090, 120, 150, 125, 130 y 131.	Omán	Noviembre 1999 – Enero 2004	12,5
<b>Northwest Africa</b> 998	Argelia o Marruecos (Sin determinar)	Septiembre 2001	0,4
<b>Los Ángeles</b> 001 y 002	EE.UU. (California)	Octubre 1999	0,8
<b>Northwest Africa</b> 3171, 2046, 2626	Argelia	Sept. 2003 - Nov. 2004	0,6

El método de búsqueda más empleado en las regiones áridas, donde predominan los suelos desérticos y los saladares, es la visualización directa desde vehículos 4X4 desplazándose a baja velocidad. Para áreas poco extensas la búsqueda también se puede realizar a pie, tanto de forma individual como en pequeños grupos organizados. Es frecuente que las primeras búsquedas se realicen al azar, y que conforme se vayan descubriendo nuevos ejemplares la búsqueda se reoriente en función de la forma que muestre lo que los especialistas llaman la elipse de distribución. Como su propio nombre indica, ésta es la distribución que sobre el terreno muestran los meteoritos asociados a una misma caída. En unos casos los meteoritos se orientan (es decir, cayeron) siguiendo una línea recta a lo largo de decenas o centenares de kilómetros; en otros, se agrupan dentro de un área muy concreta siguiendo un patrón de distribución con forma de nube. En estos casos la búsqueda se simplifica bastante, pues una vez delimitada la zona de caída sólo queda rastrearla minuciosamente. También puede suceder que la caída se produjera sin un patrón bien definido, y es entonces cuando el factor suerte juega un papel decisivo.

Los que se dedican a este oficio saben que una forma segura de realizar un primer hallazgo en una recóndita región del desierto es a través de los llamados CAIRNS, o pilas de piedras empleadas en el Sahara para señalar las antiguas rutas camelleras. Entre estas pilas es frecuente encontrar piedras de color negro, puestas allí hace siglos para que los conductores de caravanas pudieran ver los túmulos desde lejos y evitar así perderse. Algunas de estas piedras han resultado ser meteoritos y, si suponemos que nadie se dedica a viajar durante semanas por el desierto a lomos de un camello y arrastrando una pesada piedra de color negro, podemos deducir que en las proximidades de ese túmulo debe haber más ejemplares esperando a ser descubiertos.



*Figura 9.2. En ocasiones el paisaje no favorece a los cazadores de meteoritos, como en este caso, donde prácticamente todas las rocas que afloran sobre la arena son de color negro.*





*Figura 9.3. Dos ejemplos de Cairns, montones de piedras que actúan como balizas de posición en el mar de arena. Es frecuente encontrar piedras de color negro en estos montones, y algunas de ellas han resultado ser meteoritos.*

En octubre de 2004 la zona de hallazgos del Sahara se extendió hacia la meseta de *Jilfal Kebir*, una inhóspita región fronteriza entre Libia y Egipto. En este perdido rincón del planeta se ha localizado un campo de cráteres de impacto de unos 5.000 Km<sup>2</sup> de extensión, el mayor de cuantos se conocen. Por toda esta región se han descubierto numerosos cráteres con diámetros comprendidos entre los 50 y los 2.500 metros de diámetro, así como abundantes restos de vidrio fundido o tectitas<sup>2</sup> con valor museístico. Este espectacular descubrimiento, realizado por el astrónomo francés Phillippe Paillau en colaboración con el geólogo Ahmed Niazzy el Barkuki, de la Universidad del Cairo, viene a confirmar el papel protagonista que los desiertos cálidos de la Tierra están desempeñando en lo que a recuperación de rocas extraterrestres se refiere. Esperemos que el expolio incontrolado de este escaso y valioso bien no nos prive de algún importante descubrimiento científico.

---

2. La palabra «tectita» proviene del griego *tektos*, que significa «fundido». Son pequeños objetos vidriosos de color oscuro formados, probablemente, a partir de material fundido lanzado al espacio por los impactos de meteoritos o asteroides que han golpeado la Tierra. Este material se condensó más tarde en gotitas que reentraron en la atmósfera. Las tectitas se denominan de acuerdo al área en las que son encontradas, por ejemplo, australitas (Australia y Tasmania), indochinitas (antigua Indochina) o georgiáitas (Georgia, Estados Unidos).

## UN LUGAR EN EL MUNDO

Al Sur de Argentina, entre las provincias del Chaco y Santiago del Estero, se localiza un lugar único en el planeta. En Campo del Cielo las tradiciones orales de la etnia Toba mantienen vivo el recuerdo del lejano día en que «el Sol cayó del cielo, incendiando los bosques y las tribus se salvaron transformadas en caimanes». Con una extensión aproximada de 1350 Km<sup>2</sup>, Campo del Cielo es el mejor ejemplo de lo que los investigadores llaman una elipse de distribución, es decir, la disposición que sobre el terreno muestran los meteoritos asociados a una misma caída.

Desde el siglo XVI se vienen realizando en esta región hallazgos ininterrumpidamente. En 1980 se extrajo de un gran cráter un meteorito de 37,4 toneladas, bautizado con el significativo nombre de El Chaco.

Actualmente hay 26 cráteres registrados y estudiados con epicentro en el llamado paraje de Las Víboras, a unos 15 kilómetros al sur de la localidad chaqueña de Gancedo. Mediante el empleo de la teledetección por satélite se han detectado también más de una decena de posibles cráteres de impacto que esperan ser estudiados. Meteoritos y cráteres se encuentran perfectamente alineados a lo largo de una recta con dirección Norte e inclinación 60° Este. La longitud de esta elipse de impacto supera entre sus extremos los 17,5 kilómetros de longitud, lo que la convierte en la segunda más grande observada en la superficie terrestre (la primera sería la descubierta en Egipto a finales de 2004, aún en estudio).

Las dataciones radiométricas realizadas en los laboratorios de la *Smithsonian Institution* de Estados Unidos, determinaron que entre los años 2080 y 1920 a. de C. un meteoróide gigantesco entró a la atmósfera terrestre y se fragmentó a gran altura sobre lo que hoy es esta región de Argentina. Se estima que de cada 100 objetos que impactan sobre la superficie terrestre, 93 son aerolitos (meteoritos pétreos), 5,5 son sideritos (meteoritos metálicos) y 1,5 siderolitos (mixtos). Todos los meteoritos recuperados en Campo del Cielo son sideritos compuestos de hexaedrita, una aleación de hierro al 97% con 3% de níquel.

## 10. QUIZÁ MAÑANA

Cada pocos años un asteroide de unos 30 metros de diámetro se aproxima a la Tierra rozando la órbita de los satélites geoestacionarios. Cada vez son más las evidencias que apuntan a que al menos una vez cada siglo un cuerpo de entre 30 y 50 metros golpea nuestro planeta. El último impacto se produjo la mañana del 30 de junio de 1908 en la región siberiana de Tunguska. La próxima colisión está al llegar.

En nuestro periplo anual alrededor del Sol, un viaje de 800 millones de kilómetros recorridos en 30 millones de segundos, nos acompañan más de media docena de planetas, varias lunas, asteroides, cometas, polvo volcánico, gas, radiación nuclear, neutrinos, viento solar y otros objetos de diversa naturaleza. Todos ellos siguen encadenados su propio viaje por caminos que se entrelazan y se cruzan. Cada segundo avanzamos más de 30 kilómetros en el espacio, y si algo está allí esperándonos o se mueve hacia el mismo punto que nosotros, chocaremos. En otras palabras, si existe una seria posibilidad de chocar con un cometa o un asteroide, entonces es muy probable que esto haya ocurrido ya en el pasado y vuelva a suceder en el futuro.

Tanto la colisión múltiple del Cometa Shoemaker-Levy 9 contra Júpiter, como el paulatino descubrimiento de evidencias de impacto meteorítico en el registro geológico, casi todas ellas asociados con algún episodio de extinción en masa<sup>1</sup>, han servido para concienciar a la comunidad científica sobre la magnitud de una amenaza que, nunca mejor dicho, se cierne sobre nuestras cabezas. Telescopios de todo el mundo escudriñan cada noche el cielo en busca de objetos con órbitas cercanas a la de la Tierra. En la jerga de los especialistas

---

1. La evolución de la biosfera se ha visto repetidamente interrumpida por grandes crisis ecológicas que han tenido como efecto una gran mortalidad, la pérdida significativa de biomasa y la extinción de más del 50% de las especies dentro de unos intervalos de tiempo geológicamente cortos (desde meses hasta 3 millones de años). En los últimos 600 millones de años de la historia de la Tierra se han registrado entre 14 y 18 extinciones. Durante los últimos 250 millones de años, estas extinciones en masa tuvieron lugar a intervalos de 26-30 millones de años.

se los conoce como NEOs (de *Near-Earth-Objects*), un término que engloba tanto a los núcleos cometarios inactivos como a los asteroides de los grupos<sup>2</sup> Amor, Apolo y Atenas, cuya proximidad los convierte en una potencial amenaza para nuestra seguridad.

Diversas instituciones vienen trabajando desde hace años en proyectos de vigilancia espacial orientados a la catalogación y seguimiento de estos cuerpos. En el desierto de Nuevo México se desarrolla el ambicioso Programa Lincoln de Investigación de Asteroides Cercanos a la Tierra (más conocido como LI-NEAR), un proyecto financiado por la NASA y en el que colabora el Instituto de Tecnología de Massachusetts. Desde la isla hawaiana de Maui, en colaboración con las Fuerzas Aéreas de los Estados Unidos, se lleva a cabo el conocido como Programa NEAT (*Near-Earth Asteroid Tracking*). Y en los últimos años, el Observatorio Lowell de Arizona, una vieja gloria de la astronomía planetaria, también se ha sumado a esta ardua tarea acogiendo en sus instalaciones el proyecto LONEOS (por la unión de los términos Lowell y NEO).

Estos programas ya han comenzado a dar los primeros resultados. Hasta la fecha se han descubierto más de medio millar de NEOs con tamaños superiores al kilómetro, y aunque las estimaciones apuntan a que esta cifra representa menos del cincuenta por ciento del total, los progresos están siendo significativos. Los asteroides más difíciles de detectar son aquellos que cuentan con tamaños inferiores a los 100 metros de diámetro, de los que se cree que podría existir unos 350.000 con órbitas próximas a la Tierra.

## UN TERRIBLE ESCENARIO

¿Qué capacidad destructiva puede tener un objeto de estas dimensiones? Para establecer la relación general entre el tamaño de un cuerpo impactor y el diámetro del cráter que potencialmente puede producir, los especialistas se basan en experimentos de balística y el análisis de explosiones nucleares<sup>3</sup>. Estos modelos indican que por norma general el impacto de un asteroide contra una

---

2. Los asteroides que presentan características orbitales similares (distancia al Sol, excentricidad orbital e inclinación) reciben el nombre de grupos, como por ejemplo el grupo Amor, que cruzan la órbita de Marte. Cuando un grupo parece haberse originado de la ruptura de un único cuerpo padre, entonces se denomina familia.

3. Desde una perspectiva didáctica, es fácil describir estas situaciones extremas en términos de «tantas bombas nucleares», pero no es muy preciso. Una colisión cometaria o asteroidal es bastante distinta en sus efectos a los de una bomba. Una explosión nuclear es compacta, en la zona más próxima se alcanzan millones de grados de temperatura y, además, emite radiación letal. Una colisión es mucho más fría, las temperaturas alcanzadas son similares a las de la superficie del Sol (muy altas para nuestra experiencia cotidiana pero bajas en relación a la escala nuclear) y los efectos de la onda de choque son más los de una explosión de tipo propulsor (el aire se comprime bajo el cuerpo impactor) que de tipo detonante.

superficie rocosa genera un cráter veinte veces mayor que el cuerpo impactor; pero cuando la colisión se produce contra superficies que absorben mejor la energía de la onda de choque (fundamentalmente arena, arcilla o sales) este factor se reduce a casi la mitad. Según estas previsiones, una roca de entre 50 y 100 metros, desplazándose a una velocidad de 20 kilómetros por segundo, podría generar en la corteza terrestre una cavidad de más de un kilómetro de diámetro y varios cientos de metros de profundidad. Al atravesar la atmósfera, este cuerpo se vería sometido a fuertes tensiones capaces de fragmentarlo en varios trozos antes de alcanzar el suelo. Pero si la composición del asteroide es metálica, y por lo tanto resiste bien las tensiones, logrará alcanzar la superficie sin perder demasiada masa. En este caso, la explosión resultante será comparable a la de una bomba nuclear de 2 megatones (el equivalente a la explosión de dos millones de toneladas de trinitrotolueno, el conocido TNT) y sus consiguientes efectos devastadores. Por establecer una comparación, el rendimiento de la bomba de Hiroshima fue de «sólo» 13 kilotones, es decir, trece mil kilos de TNT.

Las leyes de la probabilidad revelan que los impactos pequeños son mucho más frecuentes que los grandes. Las colisiones contra la Tierra de cuerpos de un kilómetro de diámetro tienen lugar a intervalos de varios millones de años, mientras que un evento como el antes descrito se viene repitiendo con una recurrencia estimada en algo más de un siglo. Sin embargo, y a pesar de su mayor frecuencia, en la superficie terrestre escasean los cráteres de menos de 5 kilómetros de diámetro. ¿A qué puede ser debido este sesgo en el registro? Los modelos informáticos revelan que los asteroides rocosos de menos de 200 metros no logran superar con facilidad las tensiones que les provoca el rozamiento con la atmósfera.

Semejante protección no es tan benigna como pudiera parecer, pues cuando los objetos explotan en el aire (como la bomba nuclear que arrasó Hiroshima) sus efectos se esparcen por una superficie mucho mayor. Un claro ejemplo de este fenómeno sería la explosión de Tunguska, ocurrida en 1908 y causada por la entrada en la atmósfera de un fragmento de cometa de unos cien metros de diámetro y un millón de toneladas de peso. No se generó cráter, y apenas se encontró rastro del impactor en el suelo siberiano, pero el estallido aéreo abatió e incendió 2.200 km<sup>2</sup> de bosque (el equivalente a 220.000 campos de fútbol). Es decir, más del doble de lo esperado si el cuerpo impactor hubiera alcanzado la estepa siberiana. La onda de choque atmosférica dio dos veces la vuelta a la Tierra y lanzó tanto polvo a la estratosfera que la luz solar se dispersó desde la cara iluminada del globo a la parte oscura. En Londres, a 10.000 kilómetros de distancia del punto cero, el cielo de medianoche se iluminó como al atardecer. En un planeta cada vez más poblado una explosión aérea de este tipo podría tener efectos más devastadores que los producidos por un impacto localizado.



## UN PROBLEMA DE MEMORIA

Pero, si los impactos de este calibre son tan frecuentes y peligrosos, cabe preguntarse: ¿no debería existir algún tipo de registro, tradición cultural o memoria histórica que le recuerde a la humanidad la recurrencia de este proceso? La respuesta es un *No* rotundo.

La memoria histórica para los eventos catastróficos ha demostrado ser muy frágil, sobre todo cuando suceden en algún lugar remoto del planeta, alejado de cualquier urbe occidental. Quizá el mejor ejemplo de catástrofe natural recientemente olvidada sea la erupción del monte Tambora de 1815. Este volcán, situado en la isla indonesia de Sumbawa, estalló matando a 100.000 personas en la explosión y los tsunamis relacionados. Se estima que la explosión mayor fue equivalente a 60.000 bombas del tamaño de la de Hiroshima. Sin embargo, la noticia de este evento tardó en llegar a Europa siete meses, cuando ya se sentían sus efectos sobre la atmósfera. El año 1815 pasaría a llamarse el año sin verano: el invierno volcánico asociado a la erupción, por la cantidad de polvo emitido a la atmósfera, que reflejó la luz del Sol, impidió que crecieran los cultivos en Europa y Norteamérica. Ese año las heladas duraron hasta el mes de junio y la escasez de pastos mató a miles de cabezas de ganado. Sólo en Irlanda la hambruna y las enfermedades acabaron con la vida de 65.000 personas. 1815 fue un año verdaderamente horrible, pero su recuerdo se ha borrado de la memoria colectiva de la humanidad... ¿Por qué habríamos de recordar entonces el impacto de un cometa o asteroide? Es más, de haberse producido en la antigüedad, ¿habrían sabido interpretar este fenómeno cósmico nuestros antepasados ?

## ECOS DEL PASADO

En los textos de algunos autores clásicos podemos encontrar claras pruebas de que la caída de «estrellas» desde el cielo era un fenómeno observado y conocido ya en la antigüedad. El poeta Virgilio describe en *La Eneida* (Lib. II, 695) un interesante suceso de esta naturaleza:

*Apenas acabó [de rezar] cuando el sereno  
cielo a la izquierda parte dio un gran trueno.  
Corrió una estrella y, con luz fogosa,  
dejó la oscura noche esclarecida:  
pasó junto a las torres presurosa  
y fue a esconderse tras el monte Ida;  
por largo trecho abrió una vía lumbrosa;  
dio olor de azufre el aire en su camino.*

Siglos antes Aristóteles, en su obra *Meteorológicos* (Lib. I, 341b), reconoce la existencia de estos bólidos bajo el término genérico de *meteoros ígneos* y, si bien les atribuye un origen puramente atmosférico, los clasifica en tres categorías que hablan por sí solas: llamas ardientes, estrellas fugaces y antorchas.

Plinio el Viejo dedica varios apartados en el Libro II de su *Historia Natural* a este tipo de fenómenos. En el capítulo XXXIV podemos leer: «Un escudo en llamas cruzó centelleando desde el poniente al oriente a la caída de la tarde. Y en el capítulo XXXV: una centella que se vió desprender de una estrella, aumentó de tamaño en su aproximación a la tierra y, tan pronto como alcanzó las dimensiones de la Luna, empezó a dar una luz como la de un día nublado; luego, al retroceder al firmamento, se convirtió en una antorcha». Otro acontecimiento celeste especialmente sospechoso es el que se refiere a las «noches claras como el día» (Lib. II, 33) observadas en Galia (actual Francia) hacia el 113 a. de C. Por lo que sabemos hasta ahora, ¿cuántos procesos geológicos pueden emitir a la estratosfera la suficiente cantidad de polvo como para permitir que la luz solar se disperse desde la cara iluminada del globo a la parte oscura?

Pero, de todos los fenómenos celestes relacionados con catástrofes, quizá el testimonio recogido en el poema didáctico *De Rerum Natura*, del escritor latino Lucrecio, sea el más interesante. En el Libro V (550) podemos leer:

(...) triunfó no obstante el fuego, y una parte  
del mundo consumió con voraz llama  
cuando fue arrebatado Faetonte  
del Sol por los caballos desbocados,  
y por el aire y climas le arrastraron;  
pero entonces el Padre Omnipotente  
colérico y furioso lanzó a tierra  
un pronto rayo desde el mismo carro (...)  
los poetas antiguos de la Grecia  
así cantaron; la razón lo impugna,  
puesto que puede superar el fuego,  
si moléculas ígneas abundantes  
caen desde el Universo en nuestro globo (...).

Los astrónomos Victor Clube y Bill Napier defienden la idea de que textos como los antes mencionados describen colisiones asteroidales o cometarias, hechos catastróficos que pudieron traumatizar a la humanidad en su infancia. Quizá con el objetivo de perpetuar su recuerdo estos eventos fueron incorporados en nuestra cultura a través de relatos míticos. Una de las pruebas que esgrimen a favor de esta hipótesis es el hecho contrastado de que para distintas culturas

y en diferentes momentos de la historia la aparición de cometas y bólidos en el cielo ha sido interpretado como una señal de malos augurios y ha generado temor entre la población. De hecho, también la tradición judeocristiana se hace eco de fenómenos como este en la Biblia. En el Apocalipsis podemos leer:

*«y las estrellas del cielo cayeron sobre la tierra como la higuera deja caer sus higos sacudida por un viento fuerte, y el cielo se enrolló como un libro que se enrolla, y todos los montes e islas se movieron en sus lugares» (Ap. 6, 13-15). (...) «y cayó del cielo un astro grande, ardiendo como una tea, y cayó en la tercera parte de los ríos y en las fuentes de las aguas» (Ap. 8, 10-11).*

La interpretación literal (no alegórica) de los textos bíblicos y los mitos grecolatinos es una práctica que no cuenta con demasiados partidarios entre los historiadores; lo que no implica que la atrevida y sugerente hipótesis de Clube y Napier sea necesariamente falsa. Quizá tengan razón y estemos ignorando el aviso de peligro que nuestros ancestros pretendían hacernos llegar. En cualquier caso, sabedores de que vivimos en una peligrosa vecindad cósmica, quizá lo más sensato sería empezar a plantearnos cómo vamos a hacer frente a una amenaza real que está muy por encima, y nunca mejor dicho, de fronteras, culturas, economías y creencias religiosas.

IMPACTOS MÁS RECIENTES				
Nombre	País	Edad (años)	Diámetro (m)	Tamaño del Impactor (m)
Lonar	India	52.000	1.830	91 - 122
Odessa	Texas	50.000	170	8 - 11
Barringer	Arizona	49.000	1.190	60 - 80
Morasko	Polonia	10.000	100	5 - 6
Kaalijarvi	Estonia	4.000	110	5 - 7
C. del Cielo	Argentina	4.000	50-100	desconocido
Sobolev	Rusia	1.000 - 500	50	3
Macha	Rusia	700 - 500	300	15 - 20
Wabar	Arabia Saudí	450 130	120	6 - 8
Tunguska	Siberia	100	--	50
Sikhote-Alin	Rusia	60	30	1.5 - 2

## 11. APRENDER A MIRAR

Actualmente se conocen unos 170 cráteres de impacto en la Tierra. La mayoría se concentran en las regiones continentales más antiguas y estables del planeta, los denominados cratones, concretamente en los de Norteamérica, Europa y Australia. Las estimaciones de los expertos indican que aún pueden quedar por descubrir del orden de trescientos cráteres de impacto diseminados por los continentes y fondos oceánicos. La Península Ibérica es un buen lugar donde iniciar la búsqueda.

Los geólogos saben que encontrar un cráter de impacto no es una tarea fácil. La erosión, la sedimentación, la tectónica y el vulcanismo actúan como eficaces agentes remodeladores del paisaje que pueden borrar en relativamente poco tiempo cualquier evidencia de una colisión. Por esta razón, los especialistas han aprendido a buscar en las rocas y los minerales la impronta dejada por la enorme presión a la que se ven sometidos los materiales durante los pocos segundos que dura un impacto. Estas huellas pueden ser fundamentalmente de tres tipos: anomalías geoquímicas, modificaciones mineralógicas, y rasgos macroscópicos relacionados con la deformación y transporte de los materiales.

En la Península Ibérica se han encontrado evidencias asociadas a los cráteres Chicxulub de Yucatán (México) y Tore Sea-Mount, localizado éste último a unos 300 kilómetros de las costas de Portugal. Otros indicios, en especial los relacionados con las cuencas de Azuara y Rubielos de la Cérda (Zaragoza), protagonizan desde hace casi dos décadas una fascinante controversia científica que, lamentablemente, no recibe por parte de la comunidad científica la atención que sin duda merece. Pero, además de estos casos más o menos famosos, existen en nuestro país otros lugares de especial interés «astrogeológico» apenas conocidos por un reducido grupo de especialistas.

¿Qué pistas rastrean los geólogos cuando buscan las evidencias de un impacto? Para saber qué huellas buscar en las rocas, antes debemos conocer con detalle el proceso que las genera.

## RADIOGRAFÍA DE UN IMPACTO

El proceso de craterización básicamente consiste en la liberación instantánea de la energía cinética de un objeto o bólido, que se desplaza por el espacio a una velocidad comprendida entre 5 y 40 kilómetros por segundo, tras impactar contra una superficie. El término bólido engloba a meteoritos, cometas y asteroides.

Cuando una roca de varios cientos de metros alcanza la superficie de la Tierra a una velocidad supersónica, genera una onda de choque que en pocas décimas de segundo logra excavar una estructura con forma de cuenco denominada cavidad transitoria (Figura 11.1). El lugar del impacto se ve sometido entonces a una intensa presión que excava, deforma, funde y desplaza los materiales que constituyen el lecho rocoso. Como consecuencia las rocas se funden y enfrían casi instantáneamente dando lugar a escombros, o brechas de fundido, y esférulas de vidrio (Figura 11.2). La estructura cristalina de algunos minerales se fractura al paso de las ondas de choque. En este sentido el cuarzo desarrolla unas estrías orientadas en más de una dirección llamadas PDF (Figura 11.3), e incluso puede llegar a recrystalizar para dar lugar a dos nuevos minerales que únicamente se han encontrado en zonas de impacto: la estishovita y la cohesita. Además de fusión y recrystalización, algunos cantos sufrirán un proceso de espalación, es decir, perderán las capas más superficiales por la interacción con la onda de choque (Figura 11.4).

A

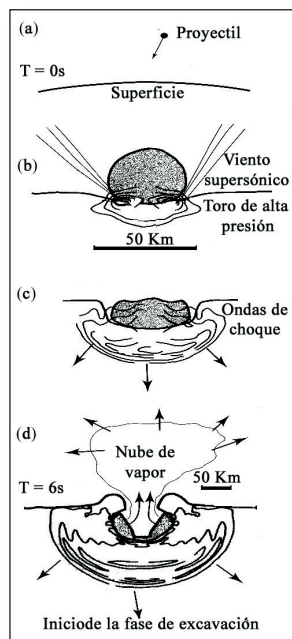
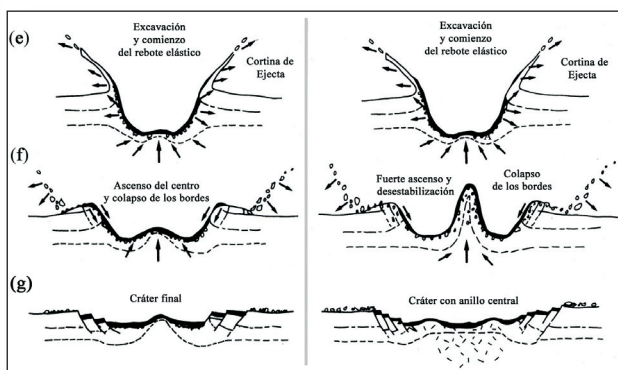
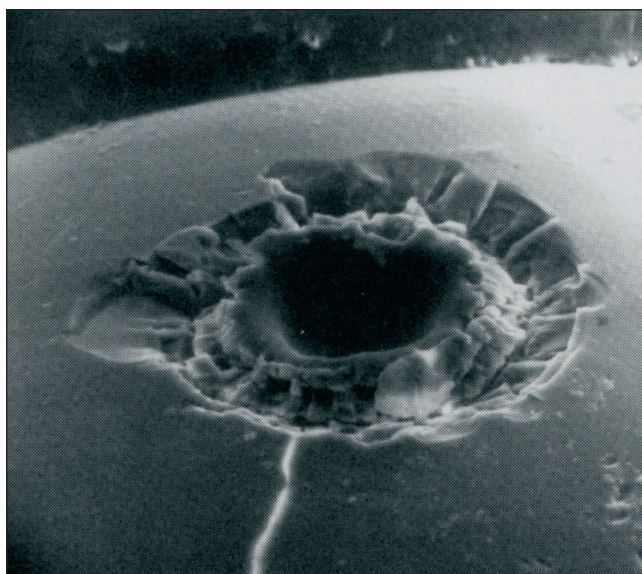


Figura 11.1. Primeros seis segundos de la secuencia de formación de un cráter de impacto (A). La forma final de la estructura (B) dependerá del tamaño del proyectil y de la respuesta elástica del terreno: a mayor tamaño, mayor energía liberada y mayor complejidad morfológica. (Modificado de Melosh, 1989).

B

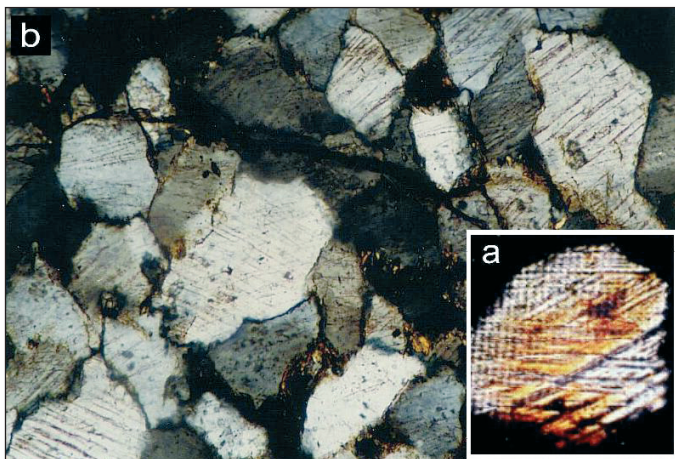






*Figura 11.2. Microcráter de impacto de unos 0.03 mm en una esférula de vidrio recogida por la misión Apolo 11 en la Luna. (NASA/JPL).*

*Figura 11.3. Dos ejemplos de fracturas del tipo PDF en cuarzo: (a) detalle de una muestra procedente de Yucatán y relacionada con el cráter Chicxulub, y (b) una muestra procedente de Azuara (Cortesía de Francisco Anguita).*



*Figura 11.4. Canto con evidencias de espalación (cortesía de Kord Ernstson y Fernando Claudín).*

A mayor escala la onda romperá las rocas siguiendo un patrón cónico, formando los conocidos como *shatter cones* o conos astillados, cuyo tamaño puede oscilar de menos de un centímetro a varios metros de longitud (Figura 11.5). Los vértices de estos conos tienden a apuntar hacia el lugar del impacto. Las elevadas presiones y temperaturas pueden llegar a aglomerar fragmentos de roca en una matriz (la parte que mantiene ligada la roca) de vidrio fundido, formando un tipo de roca llamado suevita (Figura 11.6a). Cuando la propia matriz está constituida por fragmentos de minerales y rocas de tamaño dispar, nos encontramos entonces ante lo que los especialistas llaman una diamectita (Figura 11.6b).

Las rocas fundidas por un impacto pueden presentar una composición peculiar. En general, una roca de impacto es una mezcla de varias rocas que han recibido la onda de choque y se han comprimido y calentado hasta superar su punto de fusión. Algunas rocas pueden presentar cantidades anómalamente altas de ciertos elementos traza (aquellos que aparecen en cantidades inferiores al 1% de la composición total) exclusivos del cuerpo impactor. Por ejemplo, la concentración de níquel en una roca fundida tras una colisión puede ser hasta veinte veces mayor que en el sustrato local antes del impacto. El níquel, el platino, el iridio y el cobalto existen en mayor concentración en los núcleos de hierro de los planetas que en sus cortezas, pues tienden a emigrar hasta ellos durante el llamado proceso de diferenciación (separación de los materiales según sus distintas densidades: los más pesados, como el hierro, van al núcleo, los más ligeros, como las rocas, a la corteza). Por esta razón estos elementos se denominan siderófilos, literalmente amantes del hierro. Los elementos siderófilos no abundan en las rocas de la corteza terrestre, pero sí en asteroides y cometas formados de manera independiente a los planetas. Por consiguiente, una alta concentración de elementos siderófilos en una roca fundida constituye un excelente indicador de un impacto meteorítico.



*Figura 11.5 Conos astillados (shatter cones) hallados cerca de Olalla, en la parte Norte del borde de la cuenca de Rubielos de la Cérda. (Cortesía de Kord Ernstson y Fernando Claudín).*

Mientras se forma la cavidad del cráter, una ingente cantidad de rocas salen expulsadas a velocidad supersónica. A través de decenas de kilómetros, este material, que en la jerga de los geólogos se lo conoce como *eyecta*, se desplaza por el aire comportándose como un flujo caliente y turbulento capaz de arrasar cuantos obstáculos encuentre a su paso. Las rocas que viajan en este flujo sufren continuos choques e impactos que las deforman y estrían de manera muy compleja. Muchas de las rocas eyectadas se fundirán entonces

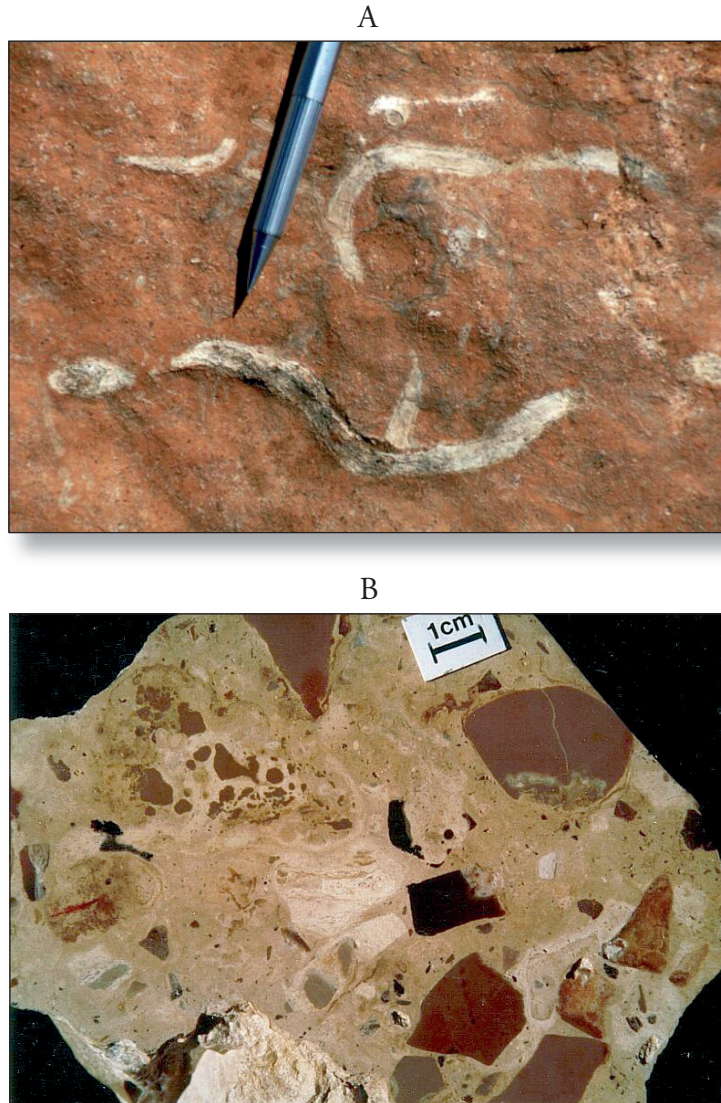


Figura 11.6. Ejemplos de suevita (A) y diamectitas (B) halladas en la cuenca de Azuara. (Cortesía de Kord Ernstson y Fernando Claudín).



parcialmente debido a la presión que llegan a ejercer unos cantos contra otros. En estas condiciones también puede producirse la espalación o pérdida de las capas más superficiales de las rocas. Este material terminará por depositarse de forma anárquica, sin ningún criterio de clasificación (Figura 11.7 a y b), por lo que es frecuente encontrar que bloques de gran tamaño han quedado depositados en la cima de una montaña..., cuando no es un bloque del tamaño de una montaña el que queda depositado en mitad de una llanura



*Figura 11.7. Megabrechas del cráter de impacto de Sudbury, en Canadá (a); y ejemplo de bloque anguloso en una megabrecha próxima a Belchite, muy cerca de Azuara (b). (Cortesía de Francisco Anguita y Dieter Stöffler).*

Tras sufrir este terrible golpe, la respuesta inmediata del terreno será un ascenso del centro de la cavidad por rebote elástico. Este rebote generará a su vez un fuerte ensanchamiento de la cavidad inicial o transitoria. Posteriormente el terreno se relajará y romperá en múltiples fragmentos, produciéndose así un rápido colapso de las laderas de la estructura. Durante esta etapa se forman fallas radiales al cráter. Por estas fracturas puede circular agua a elevada temperatura o roca fundida que, cuando se enfríe, formará diques o intrusiones. Finalmente, si el impacto ha tenido lugar en el océano o cerca de él, se desencadenará la formación de tsunamis, olas gigantes capaces de remover los sedimentos depositados a gran profundidad y arrasar las costas próximas al punto de impacto.

### EVIDENCIAS EN LA PENÍNSULA

En la Península Ibérica contamos con varios puntos de interés astrogeológico en lo que al estudio de cráteres de impacto se refiere (Figura 11.8). En contadas ocasiones las huellas detectadas en ellos han sido lo suficientemente claras como para que los investigadores llegaran a aceptarlas sin demasiados reparos. En la mayoría de los casos no ha sucedido así y aún son objeto de debate. Tampoco faltan los lugares donde por el momento no se han encontrado evidencias, pero no se descarta encontrarlas algún día. En cualquier caso, todos los ejemplos que a continuación presentamos tienen un denominador común: su indudable valor científico y didáctico.

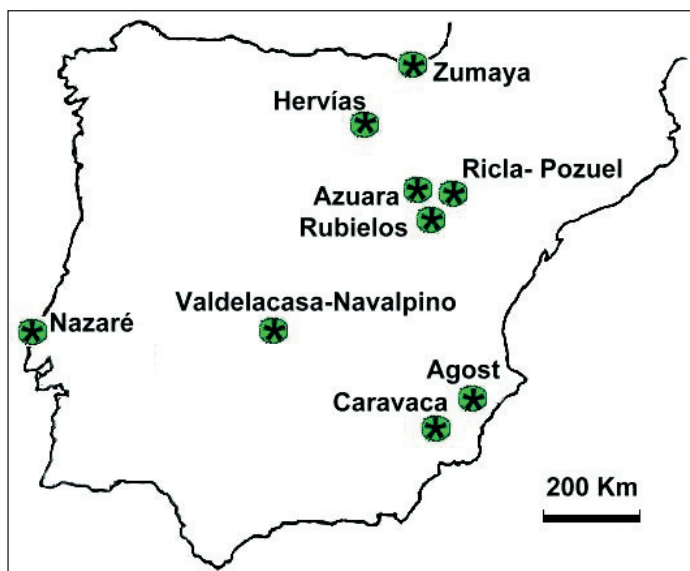


Figura 11.8. Algunas localidades en las que podemos encontrar posibles evidencias de impacto.



- **Laguna Hervías.** Ubicado a unos siete kilómetros al Este de Santo Domingo de la Calzada (La Rioja), la laguna de Hervías fue interpretada como un cráter de impacto de edad cuaternaria (últimos 1,6 millones de años) a raíz de que el Instituto Tecnológico Geominero de España (actualmente IGME - Instituto Geológico y Minero de España-) elaborara en 1990 el mapa geológico de la zona. Se trata de una depresión semicircular que cubre una extensión de  $600 \times 1.000 \text{ m}^2$  que puede tener su origen en una colisión de bajo ángulo. Sin embargo, en la zona no se han encontrado evidencias como las descritas en el apartado anterior, y las últimas investigaciones sugieren que el lago podría tener en realidad un origen puramente tectónico, es decir, relacionado con las tensiones y movimientos propios de la corteza terrestre. En cualquier caso, los especialistas carecen de pruebas concluyentes que permitan establecer su origen sin ningún género de dudas.

- **Eyectas del cráter Tore Sea-Mount.** Ubicados en la costa atlántica portuguesa, estos depósitos fueron descubiertos en 1997 al Norte del pueblo de Nazaré. El cráter se encuentra situado a unos 300 kilómetros al Oeste, y su edad estimada es de 90 millones de años. Los depósitos se encuentran distribuidos por un área de apenas  $60 \times 10 \text{ m}$  y han sido clasificados como brechas. Están constituidos por fragmentos angulosos de rocas de diferentes composiciones y tamaños que oscilan entre unos pocos milímetros a casi un metro. En los depósitos también se observan restos de rocas presumiblemente fundidas por la colisión. Este impacto coincide en el tiempo con una extinción en masa que además tiene asociada una anomalía de iridio de escala global.

- **Zumaya-Agost-Caravaca.** Las intensas anomalías de iridio detectadas por todo el mundo en los materiales que se depositaron hace 65 millones de años en el llamado límite K-T o límite Cretácico-Terciario, han sido bien estudiadas en la Península Ibérica. Se sitúan fundamentalmente en las localidades de Zumaya y Eibar (en Guipúzcoa), Agost (Alicante) y Caravaca (Murcia). Ésta última es famosa en todo el mundo por presentar un inusual enriquecimiento de elementos siderófilos (Figura 11.9) Durante décadas su origen fue todo un misterio, pero hoy sabemos que las anomalías están asociadas al impacto que hace 65 millones de años generó el Cráter Chicxulub y provocó una de las más terribles extinciones en masa de la historia de la vida (especialmente famosa porque entre las muchas especies que desaparecieron se contaban los dinosaurios).

- **Anomalías geoquímicas de Ricla y Pozuel del Campo.** Al margen de las anomalías de iridio antes mencionadas, en la literatura científica española prácticamente no existen citas que hagan referencias al estudio de otras anomalías asociadas a posibles impactos asteroidales. Algunas extrañas anomalías han sido detectadas en Ricla y Pozuel del Campo (Aragón). Su origen se ha relacionado



*Figura 11.9. El límite Cretácico-Terciario, también llamado K-T (capa inclinada de color negro), en las proximidades de Agost, Alicante. (Cortesía de Francisco Anguita).*

tradicionalmente con la actividad volcánica e hidrotermal acontecida en la región hace 170 millones de años; pero algunos investigadores han apuntado a un posible origen extraterrestre. Las pruebas no permiten discriminar ninguna de las dos opciones.

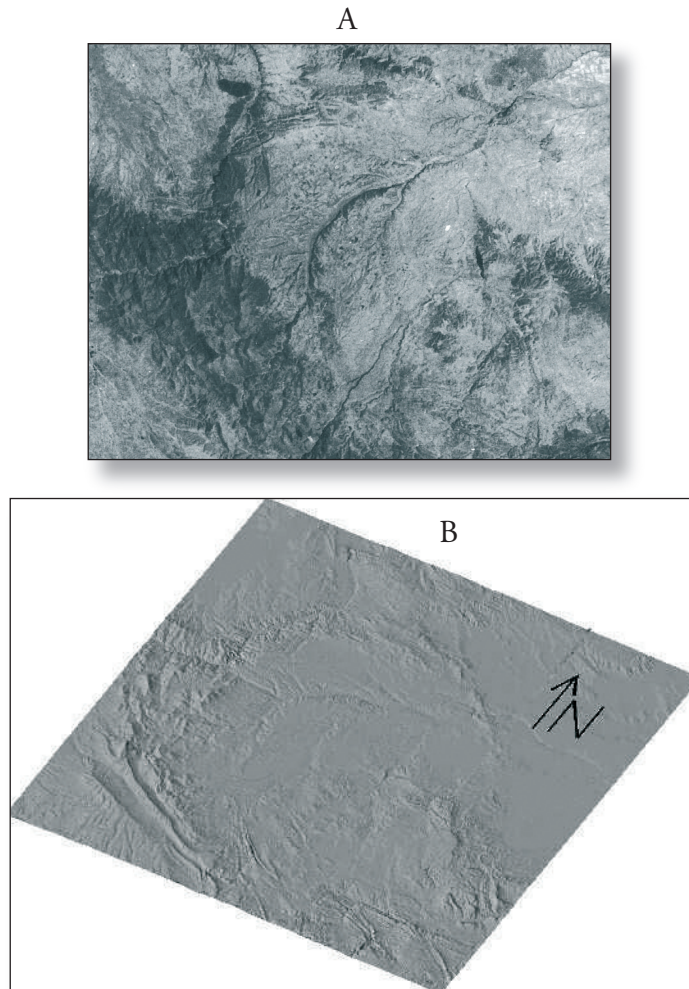
- **Anticlinales de Valdelacasa y Navalpino.** En esta región de los Montes de Toledo podemos encontrar sedimentos marinos profundos que se depositaron hace unos 540 millones de años. Algunas de estas rocas se caracterizan por presentar rasgos que evidencian procesos geológicos de gran energía. Todos ellos han sido tradicionalmente explicados en base a procesos tectónicos y climáticos; sin embargo, debido a lo mucho que se han refinado las técnicas y los criterios que se emplean para detectar evidencias de impactos, algunos investigadores consideran que sería interesante revisar estos materiales, por si se pudiera encontrar en ellos huellas de un proceso que hasta hace relativamente poco era desconocido para la mayoría de geólogos. ¿Nos ofrecerán estos materiales alguna sorpresa astrogeológica? Aún queda mucho trabajo por hacer.

- **Azuara y Rubielos de la Cérda.** Los geólogos llaman astroblema a aquellas estructuras que son objeto de debate y no han podido ser clasificadas como cráteres de impacto sin ningún género de dudas. En la Península Ibérica contamos con dos de estas estructuras, y ninguna está exenta de polémica. La historia de Azuara se remonta a los años 80, cuando un paleontólogo alemán que buscaba fósiles en Zaragoza encontró en el campo rocas que le recordaron

a las del cráter Ries, en su país. Enseguida comunicó sus sospechas a un colega geofísico, Kord Ernstson, quien inició investigaciones en la zona. En 1985 publicó sus conclusiones: en su opinión los datos apoyaban la hipótesis de que hace 30 millones de años un asteroide de 1 kilómetro de diámetro cayó en una zona cercana al pueblo de Azuara. Hasta 400 m de sedimentos depositados después habrían rellenado la depresión hasta borrar cualquier expresión topográfica del mismo (11. 10 a y b). Como principales datos de campo aportaba la existencia de megabrechas y otros depósitos situados en zonas elevadas difíciles de explicar en una geología «normal». A escala mineralógica, se basó en la existencia de microfracturas de cuarzo y vidrio (sólido amorfo generado por el rápido enfriamiento de roca fundida) en una zona sin ningún tipo de magmatismo reciente. Por último, una detallada campaña geofísica sirvió para construir secciones gravimétricas muy similares a las de otros cráteres de impacto. Todos estos datos fueron suficientes para que el Servicio Geológico de Canadá incluyera a Azuara en la lista y el mapa de cráteres de impacto reconocidos en la Tierra.

Como ha sucedido en otros tantos casos de posibles cráteres de impacto, la controversia estalló. A comienzos de la década de los 90 otros geólogos buscaron explicaciones alternativas a cada uno de los rasgos interpretados como claves del impacto, y lo consiguieron en algunos casos. Parte de los datos de campo podían interpretarse mediante procesos de naturaleza puramente tectónica. A finales de la década un grupo de investigadores solicitó que Azuara fuera excluido de la lista de cráteres de impacto terrestres, y a día de hoy Azuara no figura en la base de datos que periódicamente confecciona el Servicio Geológico de Canadá. Pero este contratiempo no ha hecho mella en los investigadores pro-impacto, quienes dieron a conocer en el año 2002 los resultados de nuevas investigaciones. Las conclusiones de su trabajo eran cuando menos sorprendentes: Azuara estaría acompañada por una segunda estructura de impacto localizada más al Sur, centrada en la localidad de Rubielos de la Cérida. Con diámetros de entre 35 y 40 kilómetros, se trataría de la estructura de impacto doble de mayor tamaño descubierta hasta el momento.

Resulta paradójico que una de las controversias más atractivas de nuestra geología, tanto en el plano científico como educativo, haya sido sistemáticamente ignorada por la comunidad científica de nuestro país, incluso cuando Azuara era visitada por expertos internacionales de reconocido prestigio. Las pruebas acumuladas a favor de un posible origen por impacto, aunque numerosas, no son concluyentes. Por el momento la controversia está dormida, quizá a la espera de que una nueva generación de investigadores aborde el problema con nuevos ojos y argumentos.



*Figura 11.10. Imagen satélite de Azuara (A) y reconstrucción virtual (B) de la estructura circular que se aprecia en la fotografía. ¿Un cráter de impacto? (Cortesía de Manuel Cabedo, Kord Ernstson y Fernando Claudín).*

### **APRENDER A MIRAR**

Aunque los impactos son un proceso geológico de gran importancia en el Sistema Solar, los geólogos no hemos abordado su estudio de forma sistemática hasta hace apenas un par de décadas. Las estructuras de impacto no son una asignatura más, ni tan siquiera un capítulo, en los planes de estudio de las facultades españolas, y pocos son los investigadores que en nuestro país se han interesado profesionalmente por este campo. Goethe afirmaba que sólo somos capaces de ver aquello que conocemos, y en este sentido la geología no es una

excepción, sino la norma. Los geólogos aprendemos a «ver» y reconocer las estructuras, formas y procesos que nos enseñan cuando somos estudiantes. En ocasiones, si tenemos la suerte de poder viajar y conocer otros paisajes, otras gentes y otras geologías, ampliaremos nuestros horizontes y aprenderemos a enfrentarnos con «nuevos ojos» a problemas que ya parecían estar resueltos.

Pero, volver a mirar y hacerse nuevas preguntas no siempre está bien visto por la comunidad científica, pues, como bien afirma el profesor e investigador Anthony Hallam *«ante una controversia, los científicos nos mostramos críticos con el contrario y conservadores en nuestras posturas»*. Esta actitud, lejos de permitir que la ciencia avance, tiende a enquistar los argumentos y a bloquear el conocimiento. Sólo quienes se acerquen sin complejos a una disciplina donde la experiencia lo es todo, sabrán que las controversias científicas son un preciado bien intelectual que debe ser tratado con respeto, pues siempre suponen una valiosa oportunidad de aprendizaje que no deberíamos dejar escapar.

En la Península Ibérica, nuestro entorno más inmediato, tenemos la suerte de contar con indicios y evidencias de uno de los procesos geológicos más importantes y espectaculares que acontecen en nuestra vecindad cósmica. Y está ahí mismo, a nuestro alcance. Sólo tenemos que ir a verlo.



## EL MISTERIO DE LAS TECTITAS

Desde el siglo XVIII las tectitas han constituido un enigma para quienes se dedican a recoger piedras y pensar sobre ellas. La palabra tectita proviene del griego tektos, que significa fundido. Son vidrios naturales cuyo peso oscila entre 1 gramo y hasta 30 kilos. La mayor parte son negras, pero las hay verdes e incluso amarillas; y suelen presentar forma de esferas, gotas o discos. Los primeros ejemplares se encontraron en la región de Moldavia (antigua Checoslovaquia), pero desde 1860 se han encontrado en otros lugares del mundo. Tradicionalmente se les ha dado nombre según el lugar donde han sido halladas, así tenemos las moldavitas de Bohemia, los cristales de Darwin en Tasmania o los cristales del desierto de Libia. Las tectitas solamente aparecen en cuatro áreas limitadas del planeta, regiones conocidas como campos de tectitas:

- Norteamérica, con una edad estimada (por datación isotópica) en 35 millones de años, se las conoce como Georgitas y Beditas.
- Europa Central, son las llamadas Bohemitas y Moldavitas, datadas en unos 15 millones de años.
- Costa del Marfil, cuya edad se estima en 1,1 millones de años.
- Australasia, datadas en 0,8 millones de años, comprenden las llamadas Australitas, Javanitas e Indochinitas. Este último campo de tectitas es el mayor del mundo, abarcando un área enorme del Sureste de Asia y Australia.

Por su estructura se deduce que se han formado a partir de un material fundido por un enorme calor, que en algún momento se han desplazado a gran velocidad (las estrías así lo señalan) para luego enfriarse muy rápido y formar vidrio. Su composición química es similar a la de las



rocas sedimentarias, pero ningún proceso terrestre conocido pudo explicar la transformación de estos sedimentos en bolas cristalinas.

Las principales hipótesis que han sido estudiadas para explicar su origen son básicamente dos: erupciones volcánicas e impactos asteroidales (tanto en la Tierra como en la Luna). La primera ha sido totalmente descartada a partir del análisis geológico y el estudio atómico de los isótopos contenidos en las tectitas. Ningún material volcánico lunar se ajusta a la composición isotópica de las tectitas. Por otro lado, la cantidad de agua de las tectitas es tan bajo que no encaja con el de ningún vidrio volcánico terrestre. El material que más se asemeja a las tectitas es el vidrio que se forma después de una explosión atómica a partir del material del suelo terrestre fundido por el intenso calor, lo que ha llevado a consolidar la hipótesis de que se trata de material fundido y salpicado durante los impactos de meteoritos gigantes en la Tierra.

Si, como se sospecha, las tectitas están asociadas a impactos, ¿dónde están los cráteres? Actualmente, tanto por sus edades como por su composición isotópica, se barajan tres posibles candidatos: el cráter de Chesapeake Bay (90 kilómetros de diámetro) podría estar asociado con las tectitas de Norteamérica; el cráter Ries (24 kilómetros de diámetro) de Alemania, con las Moldavitas; y el cráter Bosumtwi (de 10 kilómetros), de Ghana, con las tectitas de Costa del Marfil. Sin embargo, en lo que a las tectitas de Australasia se refiere, por el momento no se ha descubierto aún un cráter que pueda estar asociado.

Así pues, la gran incógnita que las tectitas plantean en estos momentos a los investigadores puede concretarse en una pregunta: ¿por qué no todos los cráteres de impacto conocidos tienen asociados campos de tectitas? Por el momento no tenemos ni la menor idea.



## 12. MINERÍA ESPACIAL

La humanidad está explotando los recursos minerales de la Tierra a un ritmo vertiginoso e insostenible. Algunos analistas predicen que nuestra supervivencia como especie dependerá a largo plazo de nuestra capacidad tecnológica para explotar los recursos de otros mundos, en especial los que pueda ofrecernos la Luna. La disciplina encargada de esta difícil tarea ya existe, recibe el nombre de Minería Espacial, y es una rama emergente de la Geología Planetaria.

Tanto por su valor estético como por sus propiedades físicas el ser humano ha buscado durante siglos diamantes a lo largo y ancho del planeta. En la cultura occidental son, junto con el oro, símbolo de poder y riqueza. En su nombre se han perpetrado los actos más atroces y vergonzosos, pero también han dado origen a verdaderas proezas tecnológicas. Sin embargo, a pesar de las pasiones que desatan, desde el punto de vista de la química su naturaleza no esconde secretos: un diamante tan sólo es carbono puro cristalizado en el interior de la Tierra bajo condiciones de muy alta presión y temperatura.

La fabricación artificial de diamantes comenzó a ser una realidad en 1955, cuando ingenieros de General Electric Company lograron sintetizar algunas muestras empleando presiones de 40.000 a 100.000 kg/cm<sup>3</sup> y temperaturas de 750 a 2.750 °C. Precisamente son estas condiciones de formación las que le confiere a un diamante su principal propiedad física: es la sustancia natural más dura que se conoce. El propio término diamante es una corrupción de la palabra griega *adamas*, que significa invencible.

La experiencia nos dice que los diamantes son un recurso natural escaso en la Tierra, pero, como veremos a continuación, la física de materiales afirma justo lo contrario. En nuestra vecindad planetaria no hay nada más común que un diamante..., al menos en teoría.

### LUCY IN THE SKY WITH DIAMONDS...

Los mundos de gas y hielo, como Urano o Neptuno, están formados en esencia por hidrógeno, helio y metano (CH<sub>4</sub>). Esta molécula, por ser el componente más pesado, tiende a caer hacia el núcleo de los planetas siguiendo un

tortuoso camino en el que la presión aumenta progresivamente hasta alcanzar los 400 millones de atmósferas y la temperatura sufre un incremento de 7.000 grados. En estas condiciones termodinámicas el metano sufre una disociación molecular completa (una pirolisis) y el carbono queda libre en el medio. Este elemento en estado puro, sometido a una elevada presión y temperatura, puede llegar a cristalizar y formar un diamante. Pero, dado que el carbono es un elemento abundante en los planetas gigantes, lo que debe existir en realidad es una continua lluvia de diamantes desde las capas más externas hacia las más internas de estos planetas, especialmente en Neptuno, donde el contenido en hielo de metano es mayor (Figura 12.1).

Este sugerente modelo fue propuesto en 1981 por el investigador Marvin Ross, pero la confirmación experimental directa de la formación de hidrocarburos y diamantes a partir de metano en condiciones planetarias no se produjo hasta dieciocho años después. En 1999 los investigadores Robin Benedetti y Raymond Jeanloz, de la Universidad de Berkeley, lograron cristalizar carbono puro tras calentar una muestra de metano a 2.500 grados y lograr comprimirla por encima de 20.000 atmósferas en el interior de un yunque de diamante. Esta confirmación del modelo de Ross tuvo consecuencias adicionales (e insospechadas) en el estudio de la compleja dinámica atmosférica de Neptuno. El proceso de separación de la molécula de metano en sus elementos constituyentes, hidrógeno que asciende hacia las capas externas y carbono que tiende a caer hacia el núcleo, debe liberar una cantidad nada despreciable de energía. Según indican las emisiones infrarrojas detectadas en el planeta, en su interior se deben producir movimientos de convección térmica que desplazan calor desde las capas internas, donde se produce la disociación, hasta las regiones más externas y frías. Este complejo proceso explicaría el origen de las nubes y los fuertes vientos descubiertos por la nave de exploración *Voyager 2* en 1989 y observados desde la Tierra con ayuda del Telescopio Espacial Hubble (Figura 12.2).

Pero seamos realistas, pescar diamantes es una tarea imposible. Más allá de la especulación propia de ciencia-ficción, resulta difícil creer que una posible (que no segura) lluvia de diamantes en el interior de un planeta gaseoso pueda llegar a ser considerado como un recurso mineral al alcance de la humanidad. Con mayor certeza sabemos que existen diamantes en el manto de nuestro planeta, pero nadie se plantea bajar a buscarlos. Más sensato parece invertir nuestro tiempo y creatividad en imaginar actividades mineras en la superficie de algún cuerpo sólido cercano a la Tierra, preferiblemente al alcance de nuestra actual tecnología. Aparentemente la Luna cumple con esos dos requisitos básicos, proximidad física y tecnológica; pero, ¿es realmente nuestro satélite un objetivo viable a corto y medio plazo?



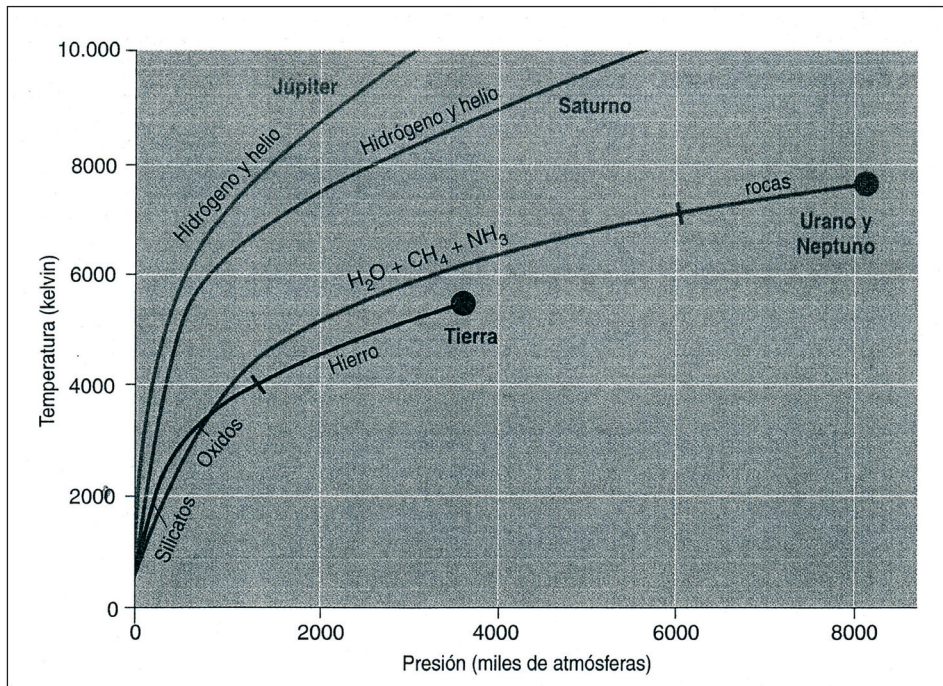


Figura 12.1. Diagrama de fase del interior de los planetas. Según algunos investigadores, es posible que en el interior de Neptuno exista una continua lluvia de diamantes (Modificado de Scandolo y Raimond, 2004).

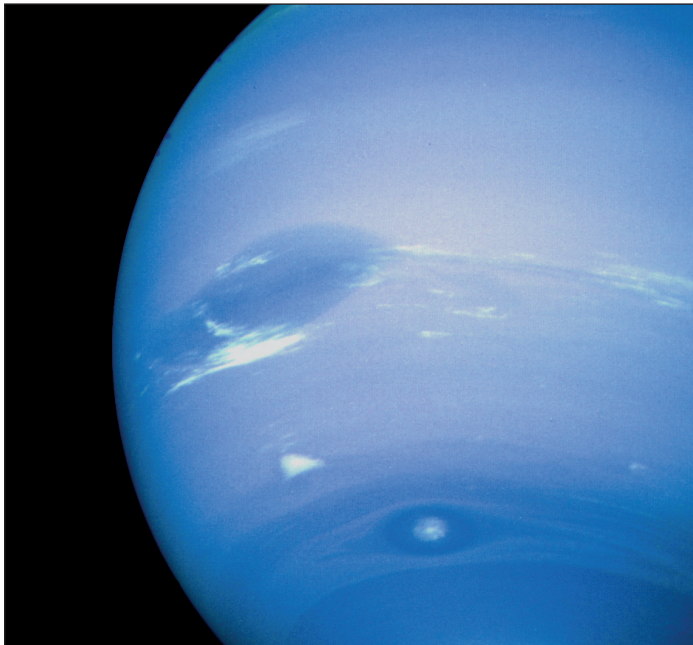


Figura 12.2. Nubes sobre Neptuno. El proceso de disociación de las moléculas de metano que presumiblemente contiene en su interior, parece ser el origen de las nubes y los fuertes vientos descubiertos en este planeta por la nave de exploración Voyager 2 en 1989 (JPL/NASA).

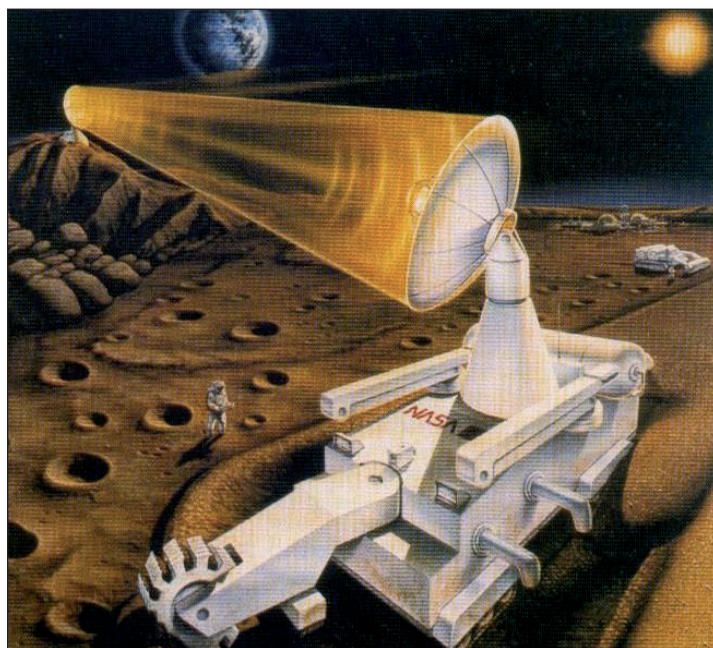


## MINERÍA EN LA LUNA

Algunos investigadores creen que la búsqueda y explotación de recursos en nuestro satélite será el paso necesario previo al establecimiento de una colonia lunar permanente que sirva de plataforma para la conquista de Marte. El principal recurso a explotar en la Luna será el suelo lunar, más conocido como *regolito*, una capa heterogénea en espesor y composición que recubre toda la superficie del satélite y está constituida por fragmentos rocosos de tamaño y naturaleza dispar. Esta capa de escombros es el resultado de la ingente cantidad de impactos meteoríticos que literalmente han machacado nuestro satélite a lo largo de sus más de 4.000 millones de años de historia. Se lo considera un recurso de interés minero por tres razones: primero porque, como si de cemento o mortero se tratara, podría ser empleado como material de construcción. Segundo, porque es muy poroso y puede estar actuando como almacén de agua en las regiones polares, y el agua es un recurso estratégico decisivo a la hora de acometer la difícil empresa de colonizar otros mundos. Y tercero, porque es en el regolito donde queda atrapado el helio 3 ( $^3\text{He}$ ) procedente del viento solar. Como la Luna carece de atmósfera y magnetosfera que la protejan, toda la radiación y las partículas llegan a su superficie, quedando



Figura 12.3. Astronauta del Apolo 17 recogiendo muestras del regolito lunar (JPL/NASA).



*Figura 12.4. Recreación del Mark II explotando regolito en la superficie lunar (Universidad de Wisconsin).*

almacenadas en los primeros 10 centímetros de estos depósitos tan porosos. A parte de su indudable valor científico, pues no podemos encontrar  $^3\text{He}$  en la Tierra, éste es un elemento de gran interés desde un punto de vista energético y económico. La razón reside en que este isótopo del helio posibilita la llamada fusión «limpia» con el deuterio, isótopo estable (no radiactivo) del hidrógeno. Dicho de otro modo: en la Luna podría residir el secreto para obtener energía nuclear sin residuos. El helio 3 se puede extraer calentando el regolito a unos  $700^\circ\text{C}$ . El problema para su explotación es la baja concentración en que se encuentra, entre 4 y 8 miligramos por tonelada (los cálculos más optimistas hablan de 13 miligramos). Si realmente el helio 3 sólo se concentra en los primeros 10 centímetros, necesitaríamos remover unos  $2.000\text{ km}^2$  de regolito para obtener una sola tonelada.

En 1994 un grupo de investigadores de la Agencia Espacial Europea (ESA), con el fin de evaluar la viabilidad tecnológica y financiera de posibles labores mineras en la Luna, recopilaron en un informe cerca de 550 proyectos (más de 6.000 páginas) relacionados con este tema. Las demoledoras conclusiones que se desprendían del análisis de todas aquellas propuestas fueron publicadas en el número 77 de la revista *ESA bulletin* (pp. 59-68). Los autores del informe desecharon por inviables el 98% de las propuestas, y concluyeron que el 2% restante sólo podrían ser realmente tenidos en cuenta a largo plazo. Al parecer, aunque la tecnología (que no la maquinaria) necesaria para llevar a cabo esos proyectos ya

existe, no se dan, sin embargo, las condiciones óptimas de cooperación internacional y voluntad política necesarias para hacer frente a unos costes iniciales de transporte, exploración y explotación mineras desmesurados.

Sería necesario diseñar y desarrollar una maquinaria específica para esta actividad, pues los modelos terrestres son inservibles bajo las condiciones ambientales extremas que imperan en la Luna. Baste un ejemplo. Se estima que la maquinaria minera terrestre más moderna podría obtener 33 kg de  $^3\text{He}$  en un año, recorriendo para ello 1 km<sup>2</sup> y arañando sólo los diez primeros centímetros de la superficie lunar. Esa misma maquinaria puede abrir en la Tierra, en el mismo tiempo y sin demasiada dificultad, un agujero de unos 25 km<sup>2</sup> y 400 metros de profundidad. Aunque ya existen algunos prototipos de robots mineros, entre ellos los de la serie Mark de la Universidad de Wisconsin, lo cierto es que no parece probable que lo veamos trabajar en la superficie de la Luna en un futuro próximo (Figura 12.4).

Una realidad que este informe no menciona, pero que sin duda es el mayor de todos los obstáculos a salvar, es el hecho de que ninguna de las agencias espaciales sabe cómo regresar a la Luna. Así es. Tanto la tecnología espacial desarrollada como la experiencia acumulada hace más de tres décadas ya no existe, fue abandonada después del vuelo del *Apolo 17*. El legado de esa generación de exploradores no ha llegado hasta nosotros, por lo que habría que volver a diseñar, construir, probar y homologar toda una nueva serie de cohetes lanzadores, vehículos transbordadores, módulos de descenso, sistemas de telecomunicaciones, trajes espaciales, vehículos de transporte..., y todo ello debería cumplir los severos estándares de seguridad con los que hoy trabaja cualquier agencia espacial. Y para muestra un botón: desde el incendio de la primera cabina *Apolo*, en 1967, accidente en el que murió toda la tripulación por un fallo de diseño en el sistema de emergencia, hasta la llegada del *Apolo 11* a la Luna en 1969, tan sólo pasaron dos años. Sin embargo, recientemente, tras el desastre del trasbordador *Columbia* en febrero de 2003, todas las misiones tripuladas de la NASA quedaron suspendidas hasta 2005. No olvidemos que el Proyecto Apolo fue la punta de lanza de la Guerra Fría durante dos décadas, y por ello cualquiera de los dos bloques enfrentados estaba dispuesto a asumir la pérdida de vidas humanas en su carrera por conquistar el espacio. Hoy ninguna agencia espacial está dispuesta a pagar cualquier precio por alcanzar sus objetivos, sean estos volver a pisar nuestro satélite o terminar de construir la Estación Espacial Internacional.

## MINERÍA DE IMPACTO

Que la Luna no sea un objetivo viable a corto plazo y que los diamantes de Neptuno nunca vayan a estar a nuestro alcance, no suponen un serio contratiempo para el desarrollo de una disciplina tan joven como es la minería

espacial, pues los lugares más rentables donde ponerla en práctica si están a nuestro alcance, son los cráteres de impacto terrestres.

El primero en probar suerte (podríamos decir que es el padre de la idea) fue un acaudalado ingeniero de minas norteamericano llamado Daniel M. Barringer, quien en 1903 reclamó los derechos de explotación de un enorme agujero de origen desconocido en mitad del desierto de Arizona. En aquella época casi nadie creía en la posibilidad de que una gran roca pudiera caer del cielo y formar un cráter, por lo que aquella estructura, hoy llamada cráter del meteorito (*Meteor Crater*), era interpretada por la mayoría de los geólogos e ingenieros de minas como una caldera volcánica originada como resultado de una explosión en profundidad (Figura 12.5).

Pero Barringer no pensaba como la mayoría. Creía tan firmemente en el origen extraterrestre de aquella estructura circular que incluso estaba dispuesto a invertir su dinero. Según sus estimaciones, aquel cráter de casi un kilómetro de diámetro y cuatrocientos metros de profundidad sólo podía haber sido originado por la colisión de un meteorito metálico de unos 10 millones de toneladas, y tenía la firme esperanza de que ganaría una fortuna extrayendo aquel supuesto hierro. Barringer dilapidó toda su fortuna realizando perforaciones en el interior del cráter y construyendo galerías con el fin de localizar la ubicación del supuesto meteorito. No tuvo suerte. Tardó veintitrés años en descubrir que el meteorito y cuanto contenía se habían evaporado durante la colisión.



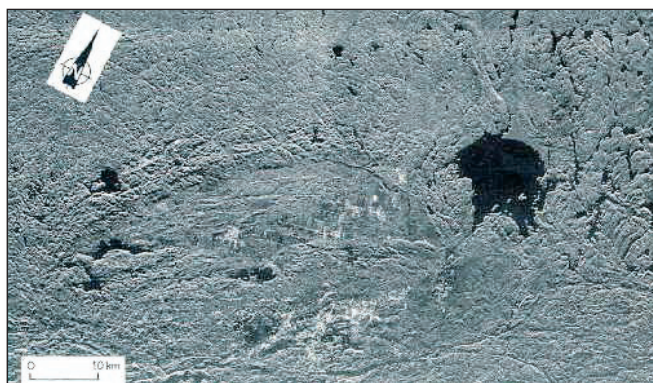
Figura 12.5. El Meteor Crater, en Arizona, fue una de las primeras estructuras de impacto reconocidas en nuestro planeta. A principios del pasado siglo el ingeniero norteamericano Daniel M. Barringer realizó sondeos en su interior para buscar metales (USGS/NASA).



A pesar de tan poco esperanzadores comienzos, hoy, después de más de medio siglo de duras batallas y controversias científicas, hemos aprendido que los lugares más adecuados donde aprender minería espacial son Sudbury, Bushveld y Vredefort, tres de las más antiguas estructuras de impacto del planeta. Y no porque allí sí se hayan preservado parte del cuerpo impactor, sino porque estos grandes impactos produjeron importantes alteraciones y anomalías en la geología de los lugares donde tuvieron lugar, los cráteres actuaron como trampas naturales donde los minerales se concentraron y preservaron de la erosión.

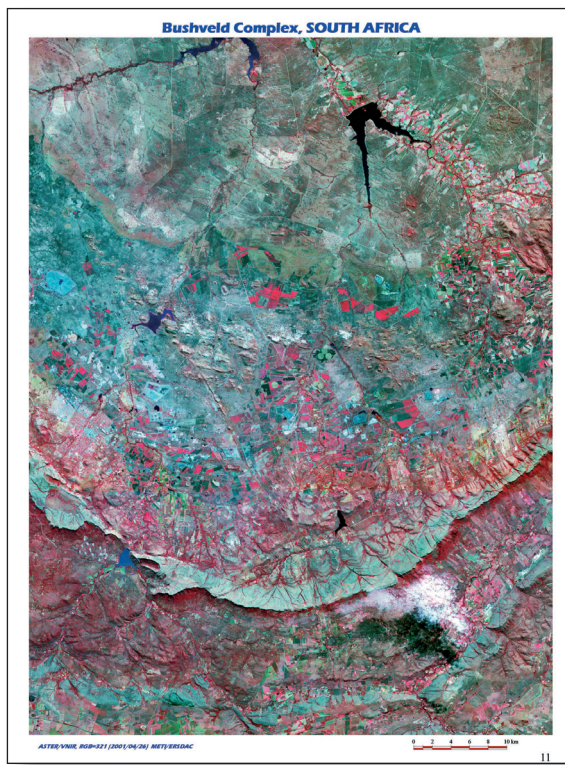
Sudbury, en Canadá, es una compleja estructura de 60 x 30 kilómetros de extensión y una edad estimada en 1.850 millones de años. En 1964 el investigador norteamericano Robert Dietz lo atribuyó al impacto de un asteroide de unos cuatro kilómetros (Figura 12.6). Hasta la fecha es el yacimiento más productivo de níquel del mundo, pero además contiene cobre, cobalto, hierro, oro, selenio, telurio y elementos del grupo del platino. El segundo lugar, Bushveld, está en Sudáfrica y sus dimensiones son de 370 x 300 kilómetros de extensión, y 8.000 metros de profundidad. En 1930 se clasificó como un astroblema (estructura candidata a haber sido originada por un impacto), y desde 1962 los especialistas la consideran un impacto basándose en pruebas mineralógicas y estructurales. Bushveld es el mayor almacén de minerales del mundo. Contiene las mayores reservas de cromo, así como grandes cantidades de vanadio, titanio, hierro y estaño. Y el último de la lista, aunque no por ello menos importante, es Vredefort, también en Sudáfrica. Recientemente se ha demostrado que es la mayor y más antigua huella de impacto de la Tierra, con una edad de 2.000 millones de años y un tamaño superior a 300 kilómetros de diámetro. Se estima que de las minas asociadas a este viejo cráter ha salido el 50% del oro que se encuentra en circulación por todo el mundo.

El estudio de las grandes estructuras de impacto en la Tierra abre nuevos horizontes para los geólogos. El futuro de aquellos que sueñan con la posibilidad de dedicarse a la minería espacial pasa por conocer mejor las grandes



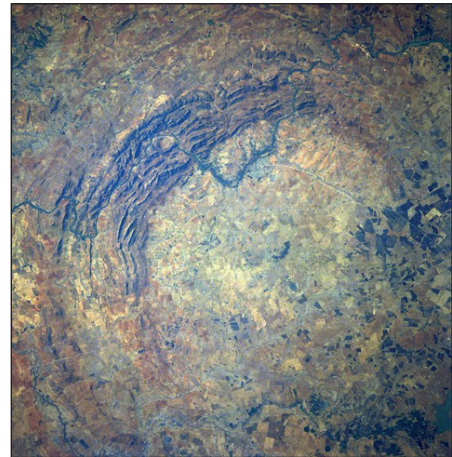
*Figura 12.6. Fotografía de satélite donde se aprecian los cráteres Sudbury (estructura alargada) y Wanapitei (lago circular en la parte derecha de la imagen) ambas en Canadá (Servicio Geológico de Canadá/Charles O'Dale, 2004)*





A

B



*Figura 12.7. Imágenes captadas desde satélite de los cráteres Bushveld (A) y Vredefort (B), ambos en Sudáfrica (Servicio Geológico Sudafricano, 2001).*

estructuras de impacto terrestres, así como el origen de las mineralizaciones que tienen asociadas. Quizá algún día las grandes multinacionales mineras quieran comprobar si realmente podemos extrapolar los modelos aprendidos en la Tierra a otros cuerpos planetarios, invirtiendo para ello fuertes sumas de dinero en ambiciosos programas espaciales. Quién sabe cuántos Vredefort, Sudbury o Bushveld aún nos quedan por descubrir.



### III. MYSTERIUM

*«Si queremos dedicarnos en serio al estudio de la filosofía y a la investigación de todas las verdades que somos capaces de conocer, nos liberaremos, en primer lugar, de todas nuestras preocupaciones y tomaremos la resolución de rechazar todas las opiniones a que hemos dado crédito en otro tiempo, hasta que las hayamos examinado de nuevo; y haremos luego una revisión de todas las nociones que se hayan en nosotros, admitiendo como verdaderas sólo aquellas que clara y distintamente se presenten a nuestro entendimiento».*

**René Descartes**

Discurso del Método, 1637

*«La filosofía está escrita en este libro grandísimo que continuamente tenemos abierto delante de nuestros ojos (me refiero a universo), pero no se puede entender si antes no se aprende a entender la lengua, y a conocer los caracteres, en los cuales está escrito. Está escrito en lenguaje matemático, y los caracteres son triángulos, círculos, y otras figuras geométricas, y sin estos medios es humanamente imposible entender ni una palabra; sin ellos todo es dar vueltas inútilmente dentro de un oscuro laberinto».*

**Galileo Galilei**

El Ensayador, 1623



## 13. INTRODUCCIÓN A LA GEOFISIOLOGÍA

La vida es un fenómeno capaz de interaccionar con su entorno y transformarlo. Desde hace 3.500 millones de años realiza una intensa labor de ingeniería química que ha logrado modificar la composición de la atmósfera y la corteza terrestre. Algunos programas de investigación planetaria emplean el término Geofisiología para referirse al campo de estudio que se ocupa de las interacciones existentes entre la vida y la Tierra; pero esta moderna concepción holística de los sistemas terrestres no es más que una versión actualizada de la teoría Gaia, propuesta por James Lovelock y Lynn Margulis hace tres décadas.

¿Está la vida condicionada por la compleja dinámica de los sistemas terrestres, o por el contrario es ella quien los controla a su antojo? ¿Es la Tierra un ser vivo, o tan sólo el resultado de la interacción de múltiples sistemas complejos en la frontera del caos interaccionando al azar? En 1974 los investigadores James Lovelock y Lynn Margulis pasaron a la historia de la ciencia con un controvertido artículo publicado en el número 26 de la revista *Tellus*. Bajo el título de *Homeostasis atmosférica por y para la biosfera: la hipótesis Gaia*, llamaron la atención de toda la comunidad científica al definir la Tierra como *una entidad compleja que comprende la biosfera, la atmósfera, los océanos y el suelo; que constituye un sistema autorregulador y cibernético, y que persigue un ambiente físico y químico óptimo para la vida en el planeta*. Es decir, proponían que la Tierra es un superorganismo (al que denominaron Gaia, igual que la diosa madre Tierra de los griegos) que integra tanto la parte viva como la inerte, regulando, en su propio beneficio, todos los flujos e interacciones de materia y energía existentes entre ellos.

Algunos vieron en esta teoría el influjo de dos filósofos de la naturaleza que también soñaron con modelos holísticos de grueso calibre: el ruso Vladimir Vernadsky (1863-1945), que concibió la totalidad de la vida como una capa superficial más del sistema terrestre, y para la que acuñó el término Biosfera; y el jesuita francés Pierre Teilhard de Chardin (1881-1955), paleontólogo, filósofo



y teólogo que concibió la idea de la noogénesis para contemplar la evolución del cosmos y de los seres vivos como un movimiento progresivo hacia la consciencia colectiva o noosfera de la Tierra. Por si estos potenciales antecedentes no fueran lo suficientemente pintorescos, Gaia se impregnó de las tendencias y prácticas de la llamada Nueva Era (*New Age*) que en los 70 empezaban a ponerse de moda por todo el mundo. El ambiente era propicio. Los astronautas de las misiones Apolo habían captado espectaculares imágenes de la Tierra vista desde la Luna, un cuerpo inerte y sin vida, instantáneas que evocaban la idea de planeta-refugio u oasis de vida inmerso en un universo hostil. Además, en aquella década una parte del pensamiento místico de Chardin fue publicado por primera vez, mientras que la obra de Vernadsky comenzaba a ser reeditada en Europa y Estados Unidos.

Lovelock, un hombre creativo e independiente, tampoco colaboró mucho para que Gaia se ganara las simpatías de la comunidad científica internacional, siempre recelosa de las grandes síntesis que intentan romper la tradición académica de la investigación especializada. Mientras el concepto de Gaia era acusado de indemostrable y los ritos místicos de la Nueva Era intentaban apropiarse de ella, Lovelock vendía ediciones completas de su obra sin parar. No es de extrañar que con semejante historial el nombre de la diosa griega de la Tierra quedara contaminado para la ciencia. Quienes la defendían públicamente perdieron credibilidad dentro de la comunidad científica y, junto con aquellos que sintieron un mínimo de curiosidad e iniciaron líneas de investigación en este campo, fueron calificados de *gaianos*. Por primera vez en la historia el nombre de una diosa era empleado de forma despectiva.

Con el tiempo James Lovelock y Lynn Margulis han ido perfilado y suavizando la idea original. Ya no defienden que la biosfera conduzca el sistema Tierra conforme a su interés, sino que la vida y el planeta forman un sistema único en coevolución, con condiciones reguladas hasta un cierto punto por la primera. Siguiendo estos nuevos planteamientos, Lovelock ha redefinido Gaia como *un sistema interactivo integrado por la vida, los suelos, la atmósfera y los océanos; que contiene ciclos complejos y transformación de materiales impulsados por energía biológica*. Además, poco a poco, se está lavando la imagen de la teoría de una forma más sutil. Investigadores como el holandés Peter Westbroek (fundador, en 1996, junto a otros investigadores, de la Sociedad de Geofisiología de Oxford) o Tyler Volk, han abandonando el contaminado nombre de Gaia para sustituirlo por el de Geofisiología. Este término tiene connotaciones más científicas y cuenta con unos antecedentes históricos de mayor solera, pues fue acuñado por el naturalista británico del siglo XVIII James Hutton, uno de los padres de la Geología. Éste la empleó durante una comunicación en la Real Sociedad Geológica de Edimburgo, pues consideraba que la Tierra actuaba en

su conjunto como un superorganismo y creía que la mejor forma de estudiarlo era, precisamente, mediante la fisiología.

El término Geofisiología ha comenzado a fraguar en algunos ambientes académicos y la moderación en los planteamientos está atrayendo a numerosos investigadores e instituciones que comienzan a admitir que la influencia de la vida sobre la Tierra es mucho más importante de lo que se pensaba, sobre todo a escala de millones de años. La NASA también se ha apuntado a este pensamiento global, patrocinando programas y proyectos bajo nombres como Ecología Global, Ciencias del Sistema Terrestre, Geobioquímica o Biosférica. Trabaja en el desarrollo de satélites y sistemas de observación de la Tierra capaces de medir y modelizar flujos de iones, ciclos químicos, circulación oceánica, atmosférica, balance de  $\text{CO}_2$  y el efecto invernadero. El más conocido de estos proyectos es el EOS, término ambiguo que responde tanto a la diosa griega del amanecer como a las siglas de *Earth Observatory System* (al parecer, a la NASA también le gustan las diosas, aunque se mantenga dentro de los márgenes de lo políticamente correcto). No debemos olvidar que la hipótesis Gaia fue pionera en concebir la Tierra como un todo constituido por multitud de sistemas complejos y, al margen de la controversia, su principal virtud como hipótesis reside en que reclama una mayor atención hacia los modelos globales.

La moderna Geofisiología nos recuerda que debemos prestar más atención a las propiedades específicas de la Tierra pues, aunque la visión reduccionista en que se encuentra sumergida la ciencia moderna nos ayuda a entender cómo funcionan los sistemas que la componen, no siempre puede explicarlos en su conjunto. Tanto la Tierra como la vida son sistemas complejos que cuentan con propiedades adicionales a las de sus componentes básicos. A éstas se las viene denominando como propiedades *emergentes*, y vienen a confirmar que con frecuencia el todo es algo más que la suma de sus partes. Además, las visiones holísticas dan placer a la mente de quien las contempla, y esto las convierte en una herramienta muy útil de cara a la divulgación científica y la enseñanza de las Ciencias Naturales (tal vez por esta razón calan tan bien en la sociedad, generan adeptos y se convierten en éxito de ventas); pero no debemos olvidar que también son de vital importancia en planetología, sobretudo a la hora de entender la historia y evolución global de los cuerpos que configuran el Sistema Solar. Quizá la principal diferencia entre nuestro planeta y los inhóspitos Marte y Venus sea que aquí la vida logró coger el timón de la nave Tierra justo a tiempo...



## 14. LA LUNA Y EL CLIMA

Los modelos sobre estabilidad orbital indican que los ejes de rotación de Venus y Marte pueden haberse comportado de forma caótica a lo largo de su historia, provocado con ello catastróficos cambios en su clima global. Por el contrario, los parámetros orbitales de la Tierra parecen haberse mantenido estables en los últimos millones de años, una afortunada anomalía que ha favorecido el desarrollo de la vida en el planeta.

Los historiadores de la ciencia consideran a Hiparco de Nicea el primer astrónomo científico de Occidente. También se le atribuye el mérito de ser el primer arqueoastrónomo de la historia pues, con la intención de descubrir posibles variaciones en la bóveda celeste a escalas temporales superiores a las de una vida humana, llevó a cabo el primer estudio comparativo sistemático entre las observaciones astronómicas registradas en la antigua Babilonia y las realizadas por sus contemporáneos griegos de los siglos II y III antes de Cristo. Sus indagaciones en la Biblioteca de Alejandría le llevaron a descubrir que el eje de rotación de la Tierra, el conocido como eje del mundo, no apunta siempre en la misma dirección, sino que describe un amplio círculo como si del cabeceo de una peonza se tratara (Figura 14.1). Hoy el eje de rotación apunta casi directamente a la llamada estrella Polar, en la constelación de la Osa Menor, pero hace 4.700 años en esta privilegiada posición se encontraba la estrella Thuban, de la constelación del Dragón.

Según las leyes de la mecánica, si la Tierra fuese un cuerpo perfectamente rígido y esférico giraría sobre sí misma, con velocidad angular constante, en torno a un eje de rotación cuya dirección permanecería fija con respecto a las estrellas. Ahora bien, nuestro planeta ni es perfectamente rígido, ni es perfectamente esférico, ni se encuentra libre de influencias gravitatorias externas; y es por ello que la rotación terrestre experimenta variaciones en la orientación del eje de rotación. Este peculiar fenómeno, descubierto por Hiparco y hoy conocido en la jerga de los astrónomos con el nombre de *precesión de los equinoccios*, no fue explicado correctamente hasta mediados

del siglo XVIII, cuando el físico y matemático francés D'Alembert demostró que su origen es debido al ensanchamiento ecuatorial de la Tierra y las fuerzas de marea que sobre él ejercen tanto la Luna como el Sol. Hoy sabemos que la media de tiempo que nuestro planeta invierte en una precesión completa es de aproximadamente 26.000 años; y que este ciclo es de gran importancia en lo que a estabilidad climática se refiere, ya que puede provocar variaciones en la insolación de determinadas regiones del planeta.

Como es bien sabido, las estaciones del año no dependen de la proximidad o lejanía de la Tierra respecto al Sol, sino de la inclinación del eje de rotación (con un eje vertical nuestro planeta no conocería cambios estacionales). Esta inclinación o desviación del eje respecto a la vertical recibe el nombre de *oblicuidad*, y actualmente tiene un valor de 23,5 grados. Sin embargo, este valor no es constante, sino que oscila entre los 21,5 y los 24,5 grados en un intervalo de tiempo estimado en 41.000 años. Conforme se va incrementando la inclinación, los cambios estacionales se van haciendo más acusados: los veranos son más cálidos y los inviernos más crudos, las regiones polares sufren un incremento significativo del nivel de insolación y el sistema climático global tiende a desestabilizarse.

Cuando se solapan entre sí los efectos secundarios de los cambios de oblicuidad y la precesión se desencadenan fuertes variaciones en la cantidad de radiación solar que alcanzan las zonas polares durante el verano, provocando con ello cambios climáticos de carácter global.

## UN PLANETA SOLITARIO

Existe cierto consenso entre la comunidad científica a la hora de admitir que la Luna se formó hace unos 4.500 millones de años, cuando un cuerpo del tamaño de Marte chocó contra la Tierra primitiva (Figura 14.2). La colisión puso un chorro de roca vaporizada en órbita alrededor de la Tierra; los pequeños cuerpos que lo componían se acumularon tan deprisa (apenas 30 millones de años, según los análisis geoquímicos publicados en diciembre de 2005 por T. Kleine y colaboradores) que el calor generado en el proceso licuó las capas exteriores de la naciente Luna. Se formó así un océano de roca líquida (magma) que cubrió todo el satélite con una profundidad de hasta 400 kilómetros. Parece lógico suponer que las fuerzas mareales que actúan sobre el ecuador terrestre se remontan hasta aquellos primeros momentos de existencia del sistema Tierra-Luna. Gracias a estas fuerzas, poco a poco, debió ir estabilizándose el eje de rotación de nuestro planeta.



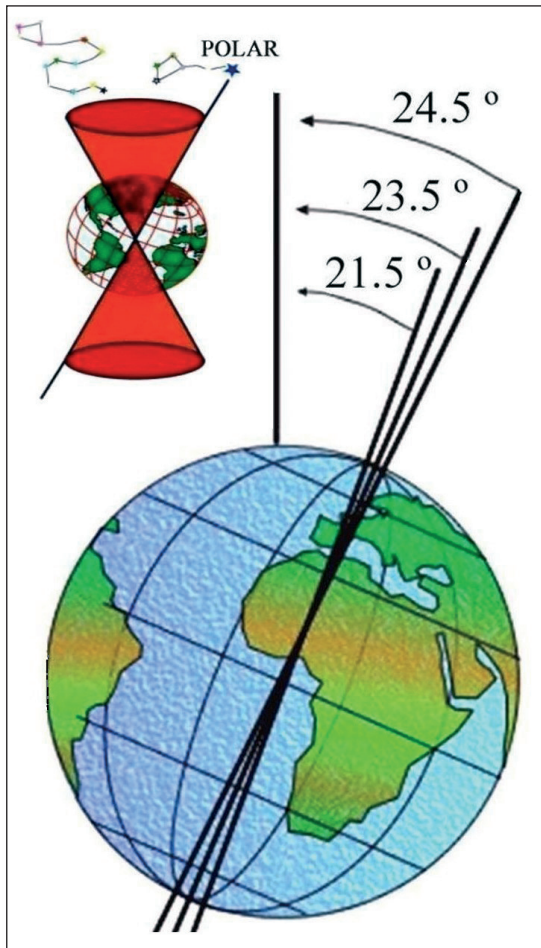


Figura 14.1. El eje de rotación de la Tierra, también llamado eje del mundo, no apunta siempre a la estrella Polar, sino que experimenta un amplio balanceo como si del cabeceo de una peonza se tratara. Este peculiar fenómeno es conocido en la jerga de los astrónomos con el nombre de precesión de los equinoccios, y en su movimiento el eje barre gradualmente el espacio equivalente a un cono cada 25.800 años.

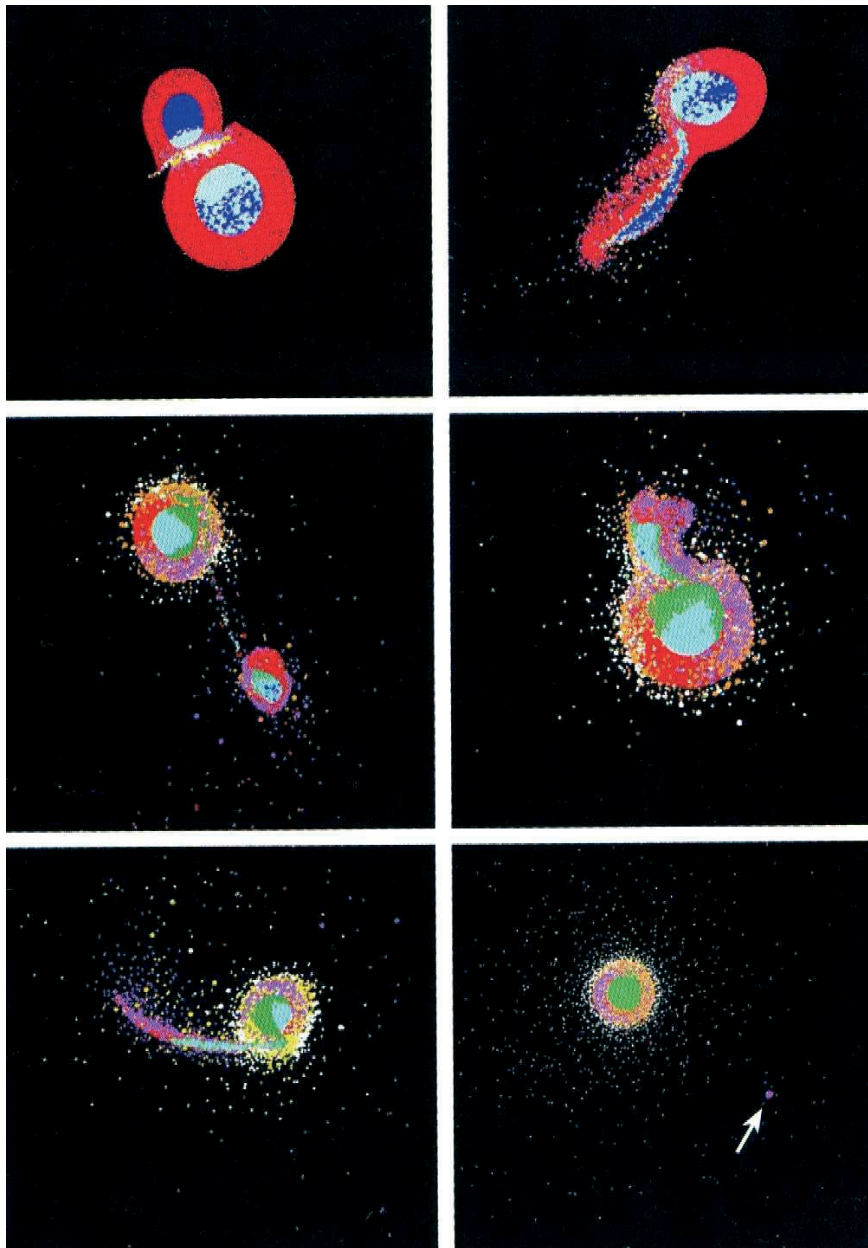


Figura 14.2. El Gran Impacto según el artista e investigador William K. Hartmann, uno de los padres de la hipótesis de la fisión inducida.

## EL DIFÍCIL NACIMIENTO DE LA LUNA

En 1984 se convocó en Kona (Hawái) un congreso monográfico sobre el origen de la Luna. Se trataba de discutir hasta qué punto los datos obtenidos en el programa Apolo habían influido en las ideas sobre el origen de nuestro satélite. En Kona triunfó arrolladoramente la hipótesis presentada en 1975 por los planetólogos estadounidenses William K. Hartmann y Ronald Davis, y a la que llamaron *hipótesis de la fisión inducida* (hoy popularmente conocida como hipótesis del Gran Impacto). Hartmann y Davis se basaron en los trabajos desarrollados durante la década de los sesenta por el científico ruso Víctor Safronov, padre de la *teoría planetesimal* (según Safronov, los planetas debieron formarse por la acreción de incontables cuerpos menores o planetésimos). Inmediatamente después de su formación los planetas atravesaron una etapa denominada Fase Cataclísmica, pues seguían existiendo cuerpos de gran tamaño en órbitas inestables que daban lugar a inevitables colisiones. Hartmann y Davis modelizaron esta etapa y descubrieron que durante los primeros cien millones de años de su historia pudo chocar contra la Tierra un planetesimal del tamaño aproximado de Marte. Ambos cuerpos estarían ya diferenciados, lo que significa que la mayor parte de sus metales habrían descendido a sus núcleos. Por esta razón los fragmentos expulsados en la colisión procederían de sus mantos, especialmente del cuerpo impactante. Estos fragmentos quedarían en órbita terrestre donde se acrecionarían hasta formar la Luna. Esta colisión pudo, además, haberle comunicado a la Tierra su presente inclinación de 23°, con lo cual el Gran Impacto sería responsable de las estaciones.

En agosto de 2001 la revista *Nature* publicó los resultados de una de las modelizaciones informáticas en tres dimensiones más sofisticadas realizadas hasta el momento. En ella se estudiaba el comportamiento e interacción de unas 20.000 partículas de distinto tamaño y diversas propiedades generadas como consecuencia de un impacto gigante. Las conclusiones venían a confirmar el modelo del Gran Impacto, aunque introduciendo algunas modificaciones respecto a la idea original. Así, según el modelo de R. M. Canup y K. Righter, el impacto habría tenido lugar cuando la Tierra aún no se había terminado de formar y era aproximadamente un 30 % más pequeña. Además, el cuerpo impactor pudo ser de un tamaño bastante inferior al de Marte, lo que hace que el fenómeno sea estadísticamente más probable.



*Los 12 primeros minutos del Gran Impacto, según una simulación de ordenador basada en la hipótesis de la fisión inducida. El núcleo del cuerpo impactor se funde con el de la Tierra (azul), mientras que la mayor parte de su manto (rojo) es expulsado al espacio. Los gráficos sucesivos se van alejando, a fin de que se pueda percibir la dispersión de los residuos del impacto. Como podemos apreciar en la reconstrucción (flecha blanca), al poco de la colisión se formó la Luna.*

Los modelos sobre estabilidad axial desarrollados por el astrónomo francés Jacques Laskar y su equipo a comienzos de la pasada década de los noventa, demuestran que de no existir nuestro satélite la oblicuidad de la Tierra podría experimentar oscilaciones de hasta 85 grados en pocos millones de años. Es decir, la Tierra podría encontrarse recostada sobre su órbita como ahora lo está Urano, y la totalidad del planeta experimentaría entonces, como ahora sucede en las zonas polares, días y noches de seis meses de duración.

Un rápido vistazo a las características orbitales de los demás planetas telúricos parece confirmar este modelo (Figura 14.3). Mercurio mantiene su eje vertical debido a las intensas fuerzas de marea a las que se ve sometido por su proximidad al Sol. Marte está mucho más lejos, pero sus satélites Fobos y Deimos tienen masas demasiado pequeñas como para estabilizar su órbita. Los trabajos realizados a mediados de los ochenta por William Ward, del *Jet Propulsion Laboratory* (JPL) de Pasadena, indican que este planeta puede sufrir variaciones en su oblicuidad del orden de 10 a 15 grados (alrededor de un valor medio de 25 grados) en pocos millones de años. Pero quizá Venus sea el caso más emblemático de todos. Este planeta posee una peculiaridad que intriga a los investigadores desde hace mucho tiempo: aparentemente no gira en el mismo sentido que los otros planetas. Su rotación es retrógrada porque gira

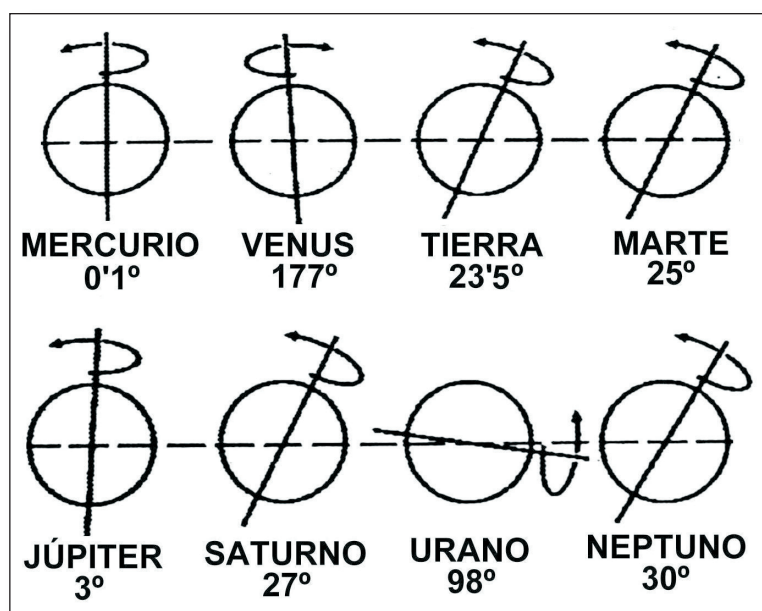


Figura 14.3. Ángulo de rotación de los planetas del Sistema Solar. Como es sabido, las estaciones del año son una consecuencia directa de la inclinación del eje de rotación de un planeta respecto a la vertical. De esta figura se desprende que ni Mercurio ni Venus pueden contar con cambios estacionales a lo largo del año.

cabeza abajo. Durante las últimas dos décadas se han barajado tres posibles causas para explicar este fenómeno. O bien el planeta se formó así, o bien pudo sufrir un gran impacto cerca de su eje de rotación, o tal vez alcanzó esta posición en algún momento de su historia como consecuencia de una fuerte inestabilidad del eje de rotación. Los modelos de Laskar y Ward parecen respaldar esta última hipótesis.

Hoy podemos afirmar que la Luna es quizá el principal agente regulador climático de la Tierra. Su presencia ha estabilizado la inclinación y la oblicuidad del eje de rotación de nuestro planeta, manteniéndolo durante millones de años dentro de unos márgenes aceptables. Unos límites impuestos por la gravedad y el azar que han permitido el desarrollo de la vida y de una civilización tecnológica como la nuestra. Sin embargo, la presencia o ausencia de un satélite gigante no justifica por sí sola las diferencias climáticas observadas entre los planetas telúricos. ¿Por qué Venus es un mundo infernal, la Tierra un planeta templado y Marte un gélido desierto? En contra de la creencia popular, el clima global de un planeta no depende exclusivamente de la distancia a su estrella, sino del delicado equilibrio existente entre la radiación solar que absorbe su atmósfera y calienta la superficie, y la radiación térmica infrarroja que emite al espacio y tiende a enfriarla. Esta delicada armonía entre flujos de energía que entran y salen del sistema Tierra es a lo que los especialistas llaman *balance climático*.

## BALANCE CLIMÁTICO

La radiación electromagnética que emite el Sol es el motor que sustenta la vida y hace funcionar los sistemas climáticos de Venus, la Tierra y Marte. Los investigadores denominan constante solar ( $S$ ) a la cantidad de energía que alcanza el borde externo de la atmósfera de un planeta en un segundo; un valor que para el caso de la Tierra asciende a 1.295 Wattios por metro cuadrado de superficie ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ), aproximadamente la misma cantidad de calor que desprenderían una veintena de bombillas como las que normalmente empleamos para cualquier flexo o lámpara de mesa. En comparación, el flujo de calor que emana del interior de la Tierra es mucho menor, entre 0,060 y 0,065  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ , lo que justifica que a la hora de estudiar el balance energético que controla el clima no sea tenido en cuenta el propio calor de nuestro planeta.

Con ayuda de dos sencillas ecuaciones podemos calcular la constante solar de cualquier cuerpo planetario. Por un lado, la energía emitida por el Sol ( $E$ ) es directamente proporcional a la temperatura de su superficie, una cantidad que podemos estimar fácilmente con ayuda de la Ecuación de Stefan-Boltzmann:

$$E = \sigma \cdot T^4$$



donde el símbolo  $\sigma$  representa la constante de Stefan-Boltzmann ( $5,670400 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ ) y  $T^4$  es la temperatura de la superficie medida en grados Kelvin (K) y elevada a la cuarta potencia. Sabiendo que la temperatura de la fotosfera solar es de unos 5.727 K (unos 6.000 °C), podemos calcular que la energía emitida por el Sol en un segundo es  $5,99 \cdot 10^7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ . Conociendo este valor, podemos calcular la constante solar (S) mediante otra sencilla ecuación:

$$S = E \cdot \left( \frac{\text{Radio del Sol}}{\text{Dist. media al planeta}} \right)^2$$

donde E vuelve a ser la energía emitida por el Sol, su radio es  $6,96 \cdot 10^8 \text{ m}$ , y la distancia media al planeta es un valor conocido (ver tabla). De esta forma podemos calcular que la constante solar de Venus es  $2.487 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , prácticamente el doble que la de nuestro planeta; mientras que la de Marte es tan sólo de  $558 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , casi tres veces menor.

De esta ecuación podemos deducir que la cantidad de energía que llega a cada planeta es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que lo separa del Sol; o dicho de otro modo, cuanto mayor es la distancia de un planeta a su estrella, menor es su constante solar, por lo que cabe esperar que su temperatura media sea más fría.

¿Podemos afirmar entonces que el clima global de un planeta depende directamente de la distancia a su estrella? Los datos aportados por los radiómetros de los satélites que orbitan la Tierra nos obligan a decir que no. Entremos en detalles.

## REFLEJOS Y ABSORCIONES

No todo el flujo solar que llega hasta el borde exterior de la atmósfera de la Tierra se transforma en calor. Una parte muy importante es reflejada directamente y devuelta al espacio por las nubes, los aerosoles (gotitas de agua y polvo atmosférico), la superficie rocosa, las masas de agua en estado líquido o sólido, la vegetación... Esta fracción reflejada recibe el nombre de *albedo* (A), y en el caso de la Tierra su valor es del 30%. Así pues, sólo el 70% de la energía solar que incide sobre nuestro planeta es finalmente absorbida por la atmósfera (23%) y la superficie (47%). El sistema climático terrestre funciona entonces degradando y redistribuyendo esta fracción no reflejada del flujo solar incidente. Posteriormente la superficie y la atmósfera terrestre así calentadas, remitirán al espacio el flujo solar absorbido y degradado en forma de radiación térmica infrarroja de mayor longitud de onda.

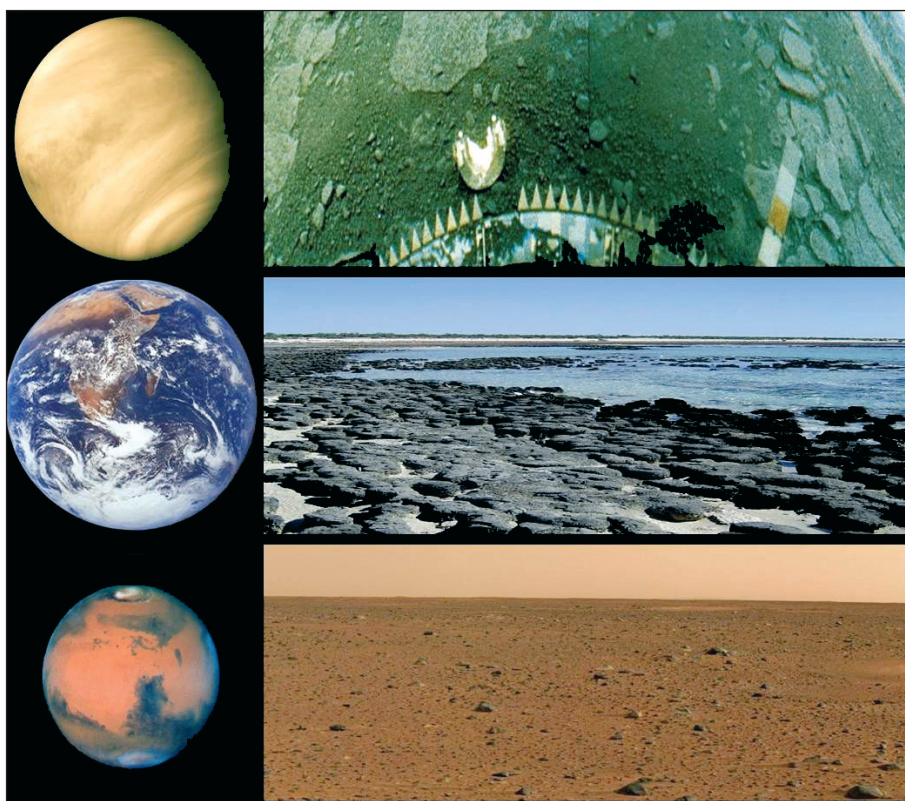


Figura 14.4. Tres paisajes planetarios. ¿Qué factores condicionan las radicales diferencias climáticas que existen entre Venus la Tierra y Marte? (NASA/JPL)

En el caso de Venus, su perpetua cobertura nubosa provoca un albedo medio del 72%, es decir, este planeta refleja directamente al espacio casi las tres cuartas partes del flujo solar que le llega, por lo que su temperatura media teórica es muy baja a pesar de su proximidad al Sol, apenas 43 grados bajo cero. Por la misma razón, la temperatura media de la Tierra debería ser igualmente baja, unos 18 grados bajo cero. Sin embargo, obvia decir que la temperatura media de que disfrutamos es de 15 grados, mientras que la superficie de Venus alcanza los 470. ¿Cómo se explica este desfase entre la temperatura real y la teórica? La clave pasa por conocer la composición atmosférica.

Se denomina *efecto invernadero* al proceso natural por el cual ciertos gases, sobre todo el dióxido de carbono, el metano y el vapor de agua, calientan la superficie de un planeta. Estos gases permiten el paso de la radiación solar hasta la superficie, pero interceptan la radiación infrarroja (térmica) que el planeta emite hacia el espacio y la reenvían hacia la superficie. Estos gases elevan la temperatura por encima de la temperatura que habría si faltaran. En el caso terrestre este incremento es de 35 grados, 470 para Venus y sólo 6 en el caso

de Marte. Sin embargo, se podría dar la paradoja de que con la composición, el albedo y la densidad atmosférica adecuadas, Marte fuera un mundo muy cálido, la Tierra una bola de nieve y Venus un planeta templado... Y todo ello a pesar de su distancia al Sol.

## UN PROBLEMA EN EQUILIBRIO

Desde hace un par de décadas los satélites pueden medir directamente el flujo solar que alcanza la Tierra y el flujo infrarrojo térmico emitido por ésta al espacio. Los valores obtenidos confirman que el balance radiativo global es aproximadamente nulo, es decir, nuestro planeta irradia al espacio una cantidad de energía igual que la que capta del Sol. Esta situación de equilibrio energético se debe a que el sistema climático no está sometido a ningún calentamiento ni enfriamiento duradero, y explica por qué la temperatura media global de la Tierra se mantiene estable.

Esta situación de equilibrio entre energía recibida y energía emitida se puede expresar mediante la Ecuación General del Balance Energético:

$$S \cdot (1-A) = 4 \cdot e \cdot \sigma \cdot T^4$$

donde  $S$  es una vez más la constante solar,  $A$  el albedo recalculado a 1 (100% = 1), el símbolo  $\sigma$  representa otra vez la constante de Stefan-Boltzmann,  $T$  es la temperatura en superficie (temperatura ambiental) elevada a la cuarta potencia y  $e$  es un factor de corrección relacionado con el efecto invernadero que recibe el nombre de *emisividad*. Para un cuerpo sin efecto invernadero el valor de  $e$  sería igual a uno y se comportaría como un emisor de energía perfecto. Para el caso de la Tierra su valor es de 0,65 (ver tabla).

Para que se cumpla la igualdad de esta ecuación, cualquier variación de sus términos, por pequeña que sea, tendrá como consecuencia un reajuste del resto de valores. Este peligroso juego ya está teniendo lugar: la emisión incontrolada de gases de efecto invernadero está provocando una variación de la emisividad, lo que a su vez desencadena un irremediable incremento de la temperatura media global. Los efectos de este desajuste en la ecuación ya se están dejando notar de forma dramática. Mientras escribo estas líneas, en Estados Unidos, la única gran potencia que no ha ratificado el protocolo de Kioto, el huracán Katrina devasta la ciudad de Nueva Orleans; centro Europa padece unas terribles inundaciones, España se seca por la falta de lluvias y el Sureste Asiático espera la llegada de un tifón (uno más) de magnitud cinco... Y según los expertos, estos son sólo los primeros síntomas del cambio climático global que ya está en marcha.

	VENUS	TIERRA	MARTE
Distancia al Sol ( $10^{11}$ m)	1,08	1,5	2,28
Radio (Km)	6.049	6.370	3.390
Constante solar media ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ )	2.487	1.295	558
Albedo (%)	75	33	15
Cobertura de nubes (%)	100	50	Variable
Temperatura en superficie ( $^{\circ}\text{C}$ )	427	15	- 53
Temperatura efectiva ( $^{\circ}\text{C}$ )	- 43	- 18	- 59
Efecto invernadero ( $^{\circ}\text{C}$ )	470	33	6
Emisividad (e)	0,01	0,65	0,90
Composición atmosférica (%)	$\text{CO}_2$ 97,0 $\text{N}_2$ < 3 $\text{H}_2\text{O}$ 0-0,3 $\text{CO}$ 0,005	$\text{N}_2$ 78,0 $\text{O}_2$ 20,9 $\text{Ar}$ 0,9 $\text{CO}_2$ 0,03	$\text{CO}_2$ 95,3 $\text{N}_2$ 2,7 $\text{Ar}$ 1,6 $\text{O}_2$ 0,13
Composición de las nubes	$\text{H}_2\text{SO}_4$	$\text{H}_2\text{O}$	Polvo, $\text{H}_2\text{O}$ y $\text{CO}_2$





## 15. UN MAR DE ROCAS

A mediados de la década de los 70, cuando el ser humano ya había pisado la Luna y enviado naves de exploración a objetivos tan difíciles como Mercurio o Marte, aún se podía leer en los manuales de astronomía rotundas afirmaciones del estilo «*sólo Saturno cuenta con un sistema de anillos*». Pero estábamos equivocados. En las últimas décadas hemos aprendido que los cuatro planetas gigantes poseen sistemas anulares de gran complejidad que comparten entre sí una importante característica estructural: su forma y distribución espacial está condicionada por el llamado Límite de Roche.

En la noche del 25 de julio de 1610 Galileo descubrió que «*la estrella de Saturno no es una sola, sino un agregado de tres que casi se tocan y que nunca se mueven o mudan entre sí...*» Sin embargo, no fue hasta casi medio siglo después, en 1655, cuando el astrónomo Christian Huygens pudo demostrar que aquellos apéndices eran en realidad anillos. En 1675 Jean-Dominique Cassini anunció el descubrimiento de una división en su interior, el único rasgo visible en que coincidirían los astrónomos durante los siguientes 300 años (Figura 15.1). Hacia 1705, y en colaboración con su hijo Jacques, Cassini (padre) propuso que la apariencia del anillo se debía a una aglomeración de diminutos satélites imposibles de apreciar por separado desde la Tierra. Más de 150 años después, a mediados del siglo XIX, los astrónomos norteamericanos William Cranch Bond y George Phillips Bond (padre e hijo nuevamente) formularon una atrevida hipótesis según la cual los anillos no eran estructuras sólidas, sino fluidas. En 1857 el físico británico James Clerk Maxwell demostró matemáticamente que el único sistema de anillos que puede existir es aquel que está compuesto por un número indefinido de partículas o cuerpos girando en órbitas independientes alrededor de Saturno y cuya velocidad depende de la distancia radial. Tras esta decisiva aportación, el estudio de los anillos permaneció estancado durante los siguientes 120 años.

El 10 de marzo de 1977, varios grupos de astrónomos observaron la ocultación por Urano de la estrella SAO158687 con el fin de obtener infor-

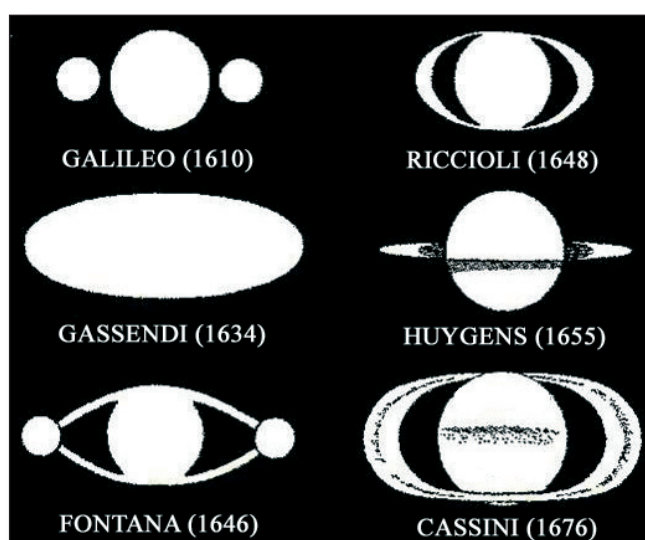


Figura 15.1. Seis dibujos históricos de los anillos de Saturno que plasman la evolución de las observaciones en el período comprendido desde su descubrimiento en 1610 hasta 1676 (modificado de Beatty et al., 1999).

mación precisa sobre el diámetro del planeta y la temperatura de su atmósfera. Para calibrar sus instrumentos, iniciaron el seguimiento mucho antes de la ocultación y lo continuaron durante todo el tiempo que les fue posible después. Para su sorpresa, la luz estelar se interceptaba bruscamente, a cortos intervalos, antes y después del paso de Urano por delante de la estrella. Al cotejar los datos obtenidos por distintos equipos pronto quedó claro que cada ocultación a un lado del planeta coincidía con una ocultación al otro, y para justificar esas observaciones había que admitir que Urano estaba rodeado de una familia de anillos estrechos y oscuros, distintos de todo lo visto hasta entonces.

En 1979 la nave espacial *Voyager 1* descubrió alrededor de Júpiter un delgado anillo tenue como el humo, demostrando así que su existencia en los planetas mayores del Sistema Solar era más común de lo sospechado tan sólo tres años antes. Aún con la evidencia de anillos alrededor de estos tres planetas persistió la duda de si Neptuno, el más lejano de los mundos de gas, los tendría también. En 1984, con un método similar al empleado para Urano, se detectaron «trozos» de anillos alrededor de Neptuno. ¿Cómo era posible que este sistema anular no se cerrara? La respuesta llegó el 24 de agosto de 1989 cuando la nave *Voyager 2*, culminando un fantástico viaje de 12 años, mostró que los arcos formaban parte de un anillo exterior completo, pero con un espesor y densidad de partículas diferente al resto.

En poco más de doce años, entre 1977 y 1984, nuestra percepción sobre los anillos planetarios experimentó un cambio radical. Pero más que las observaciones desde la Tierra, han sido las imágenes y datos registrados por las naves *Voyager*, *Galileo*, y *Cassini*, los que han hecho posible que conozcamos hoy las principales características de cada uno de ellos y podamos abordar científicamente los misterios de su origen, dinámica y evolución (Figura 15.2).

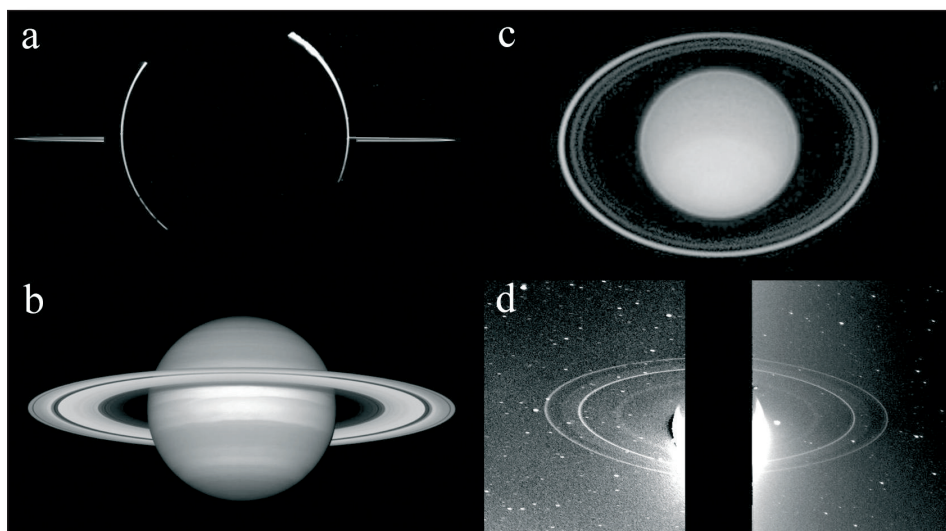
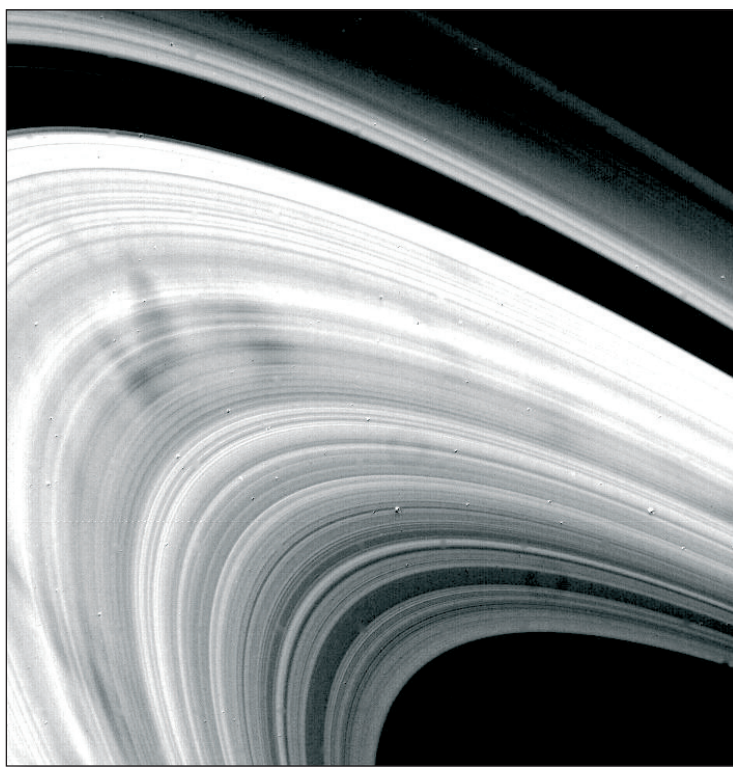


Figura 15.2. Vista general de los sistemas anulares de Júpiter (a), Saturno (b), Urano (c) y Neptuno (d). Todos distintos, todos únicos (Fotocomposición con imágenes de JPL/NASA).

## UNA VISIÓN DE CONJUNTO

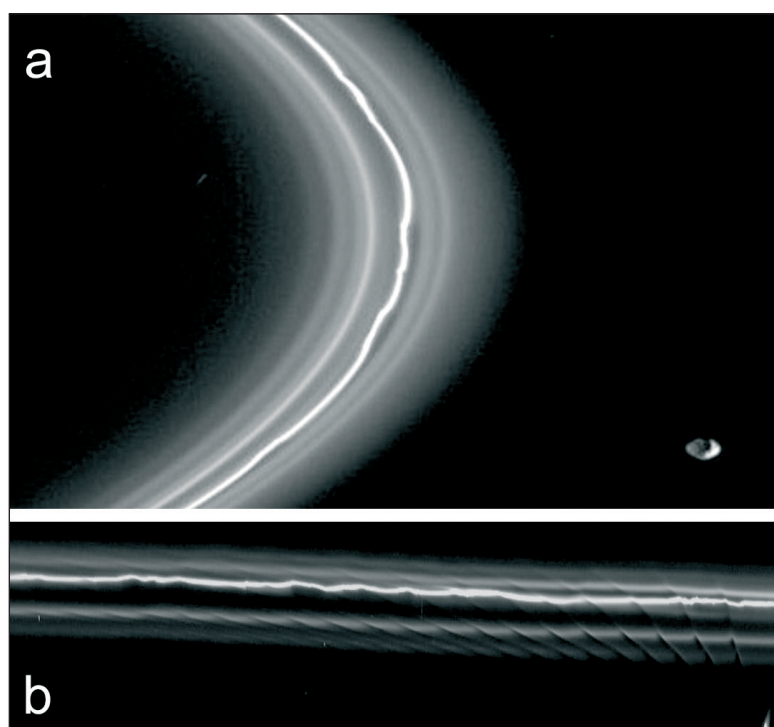
Los anillos son sistemas dinámicos constituidos por innumerables partículas de hielo y roca que interaccionan constantemente entre sí (chocan, frenan y se aceleran o se repelen unas a otras) por efecto de la gravedad y el electromagnetismo. A grandes rasgos, todos se pueden clasificar dentro de dos categorías según su espesor óptico o caída que experimenta la luz cuando incide perpendicularmente sobre ellos; propiedad que en último término depende de la densidad de partículas que hay en su interior. En los más densos, como son los principales de Urano y Saturno, apenas un 2% de la luz que incide puede atravesarlos (Figura 15.3). El tamaño de sus partículas oscila desde unos pocos centímetros, más o menos como los cantos de un río, hasta el tamaño aproximado de un autobús. Por estar tan próximas entre sí, chocan con frecuencia, lo que provoca una pérdida de energía, un incremento en el número de escombros y una redistribución de la velocidad de traslación alrededor del planeta. Puesto que las partículas más cercanas al planeta se mueven



*Figura 15.3. Imagen de alta resolución de los anillos de Saturno registrada por la nave Voyager 2 desde una distancia de 4 millones de kilómetros. Este río de escombros se asemeja a los microsurcos de un viejo disco de vinilo. Las partículas están tan próximas entre sí que la luz apenas logra atravesarlos. Las manchas oscuras de aspecto «nuboso» reciben el nombre de radios (spokes). Algunos investigadores creen que el origen de estas complejas estructuras debe buscarse en las fuerzas electromagnéticas que afectan a las partículas de menor tamaño, pero lo cierto es que por el momento no disponemos de una explicación satisfactoria para este fenómeno. (NASA/JPL).*

más deprisa que las más alejadas, los choques frenan aquéllas (y las acercan) e impulsan éstas (y las alejan).

En resumen, podemos considerar que los anillos se comportan como un fluido muy viscoso que se difunde despacio hacia dentro y hacia fuera, y que poco a poco tiende a expandirse radialmente por el espacio circundante (Figura 15.4). De hecho se estima que los de Saturno cuentan con una viscosidad cinemática (de movimiento) semejante a la del aire. A este respecto, en agosto de 2005 la nave Cassini realizó un descubrimiento fascinante: los anillos tienen una tenue atmósfera de oxígeno molecular, básicamente igual que las descubiertas entorno a los satélites Europa y Ganímedes de Júpiter. Las moléculas de agua helada que se encuentran atrapadas en ellos son extraídas por la luz solar ultravioleta y luego descompuestas en hidrógeno y oxígeno



*Figura 15.4. Dos ejemplos de interacciones gravitatorias en los anillos de Saturno. En la fotografía superior (a) se aprecia como la pequeña luna Pandora, de 87 kilómetros de diámetro, perturba la trayectoria de las partículas que conforman el anillo F. La parte de Pandora que se enfrenta directamente al anillo muestra un gran cráter de impacto, una clara evidencia del fenómeno conocido como sputtering (ver figura 15.6). Esta imagen fue captada por la nave Cassini desde una distancia de 960.000 kilómetros. En la fotografía inferior (b) se observa el llamado Efecto Prometeo, una interacción gravitatoria que debe su nombre al pequeño satélite que lo origina. Cada 14,7 horas el anillo F se quiebra y desestructura por acción del tirón gravitatorio al que lo somete esta luna (no apreciable en la imagen). Esta imagen es un mosaico de 14 instantáneas registradas por la nave Cassini, y abarca una longitud de 147.000 kilómetros. (NASA/JPL/Space Science Institute).*

atómico por fotodisociación. Mientras que el hidrógeno se pierde en el espacio, el oxígeno molecular y el agua remanente se congelan nuevamente debido a las bajas temperaturas reinantes y vuelven a formar parte de los corpúsculos que constituyen este mar de rocas. El proceso deja tras sí una concentración de moléculas de oxígeno en los anillos que forman una tenue atmósfera sobre los mismos (Figura 15.5).

Otra consecuencia directa de la alta concentración de partículas es que tiende a reforzar la atracción gravitatoria mutua entre ellas, lo que a la larga provoca deformaciones en la estructura y que los sistemas anulares tiendan a adoptar una forma ovalada.



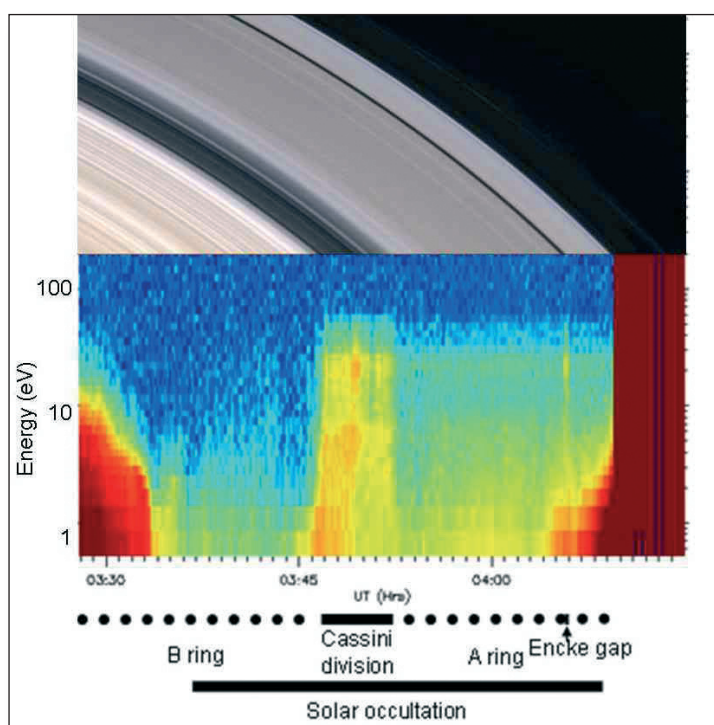


Figura 15.5. Análisis espectral de una región de los anillos de Saturno. En agosto de 2005, los espectrómetros con que está equipada de la nave Cassini, el INMS y el CAPS, pudieron determinar que el ambiente alrededor de éstos es equivalente a una atmósfera compuesta por oxígeno molecular. Las moléculas de agua son extraídas de las partículas del anillo (básicamente constituidas por hielo de agua) por la luz solar ultravioleta. Después la molécula es fotodisociada, es decir, descompuesta en sus partes esenciales: hidrógeno, oxígeno molecular y algunos electrones. Mientras que el hidrógeno se pierde en el espacio, el oxígeno atómico y cualquier remanente de agua se vuelve a congelar debido a las bajas temperaturas. Esto provoca una anomalía positiva (un incremento) en la concentración de moléculas de oxígeno respecto a las de hidrógeno. El espectrómetro INMS «ve» el oxígeno neutro, mientras que el CAPS detecta los iones de oxígeno molecular (bandas rojas de la imagen). (NASA/JPL/Space Science Institute/SWRI/UCL).

Por el contrario, los anillos más tenues, como los de Júpiter y los más externos de Saturno, tienen espesores ópticos muy bajos. Las partículas de mayor tamaño están tan separadas que rara vez chocan entre ellas, por lo que no tienden a formar un disco plano. Por la forma en que éstos dispersan la luz sabemos que sus partículas son casi tan finas como el humo.

Los anillos no son sistemas estables, pues con el tiempo las partículas tienden a caer hacia los planetas empujadas por la radiación, la gravedad y los impactos. Algunos modelos indican que la vida media de una partícula en los anillos de Saturno es de unos pocos años, de lo cual se deduce que de no existir un continuo aporte de material éstos desaparecerían en pocos millones de

años. Esto nos lleva a la pregunta más interesante de todas: ¿cómo se forman? Los modelos que actualmente se manejan tienen en cuenta varios mecanismos para explicar el suministro de material: los eyectas<sup>1</sup> generados por el flujo de meteoritos y otras partículas que colisionan contra las pequeñas lunas del sistema (proceso conocido con el nombre de *sputtering* o chisporroteo, Figura 15.6a), la actividad volcánica de mundos como Ío, Encélado o Tritón (Figura 16.4); y por último, las tensiones mareales que experimentan las pequeñas lunas y cometas que se encuentran dentro o cerca del llamado Límite de Roche.

A

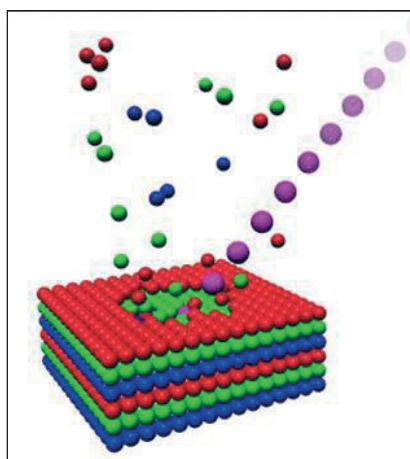
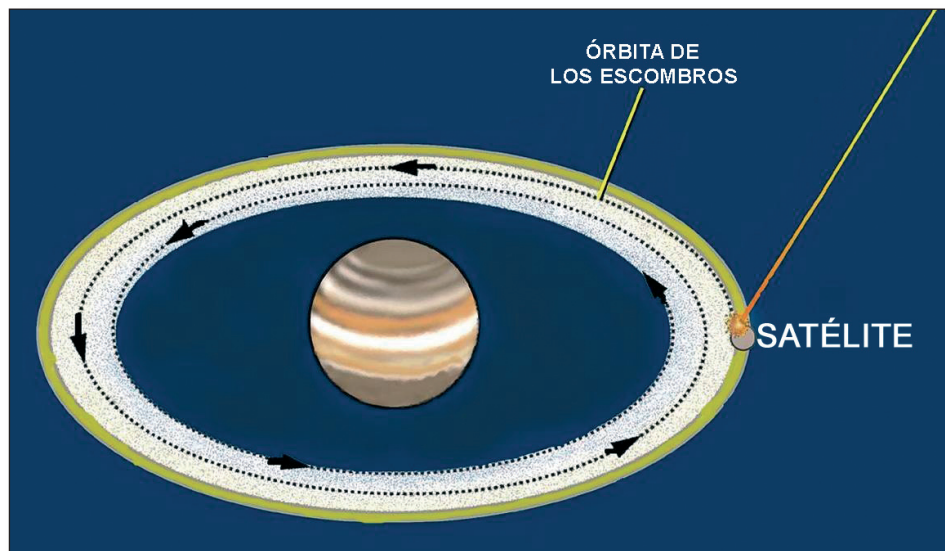


Figura 15.6. Formación de los escombros que suministran materia a los anillos mediante el proceso conocido como sputtering (A). El material expulsado tras la colisión de un meteoritoide contra la superficie de un satélite, genera un fino disco de escombros que poco a poco tiende a caer en espiral hacia el planeta (B).

B



1. Se denominan eyectas a los escombros rocosos que son lanzados a gran velocidad (cientos de kilómetros por hora) tras una colisión o impacto. Para ver cómo se generan, ver el capítulo 11.

## EN EL LÍMITE

Este concepto debe su nombre al matemático francés Édouard Roche, quien en 1848 calculó el límite teórico o distancia a partir de la cual un objeto (léase satélite) que mantiene su estructura únicamente por la acción de su propia gravedad y que orbita alrededor de un cuerpo masivo (léase planeta), comienza a desintegrarse debido a las tensiones que provocan las fuerzas de marea (Figura 15.8). Puesto que en los anillos las fuerzas de marea que tienden a disgregar superan a la gravedad que tiende a cohesionar, ningún cuerpo puede crecer por coalescencia de partículas más pequeñas. Esto significa que cualquier cuerpo de cierta entidad que se encuentre en un sistema de anillos no puede haberse formado en esa región; es decir, debe haber sido arrastrado hasta allí tras interactuar gravitatoriamente con otros satélites, o como resultado de una colisión.

Aquellos satélites naturales o artificiales que orbitan a distancias inferiores a la del límite, logran mantener cohesionada su estructura por la acción de fuerzas distintas a la gravedad, como puede ser la resistencia de los materiales a la rotura. Sin embargo, un objeto que se encuentre en su superficie puede ser desgranado por las fuerzas de marea, lo que implica que los restos del objeto (o el objeto entero) podrán salir despedidos al espacio con facilidad<sup>2</sup>.

Aunque el cálculo exacto del Límite de Roche (LR) para un planeta cualquiera no puede realizarse analíticamente, una aproximación bastante buena se obtiene por medio de la siguiente fórmula:

$$LR = r \cdot K_s \cdot \left( \frac{\rho_P}{\rho_S} \right)^{1/3}$$

donde (r) es el radio del planeta, ( $\rho_P$ ) su densidad, ( $\rho_S$ ) es la densidad de los satélites y ( $K_s$ ) su rigidez. La rigidez o grado de cohesión de un satélite varía de unos cuerpos a otros, pero se obtiene una buena aproximación si consideramos que su valor es 1,260 para cuerpos muy cohesionados y 2,423 para aquellos cuerpos que son capaces de deformarse sin oponer ninguna resistencia, tal y como haría un líquido. Así, el verdadero Límite de Roche de cada satélite se localizará en algún punto intermedio entre los límites calculados para el cuerpo idealmente rígido y el perfectamente deformable.

---

2. La velocidad de escape de un cuerpo es una propiedad que viene determinada por su masa. Las fuerzas de marea, si fueran muy intensas, contribuirían a facilitar el escape de un objeto que fuera lanzado o emitido desde ese cuerpo, pero no modifican el valor de la velocidad de escape en sí misma.

Si una luna posee una densidad superior al doble de la del planeta, tal y como puede ocurrir en un satélite rocoso orbitando un gigante gaseoso, entonces el Límite de Roche estaría dentro del propio planeta y sería una magnitud no relevante (este es lo que sucede en el sistema Sol-Tierra). En el caso de los planetas rocosos como Marte o la Tierra, cuya densidad suele ser muy parecida a la de sus lunas, el producto de la división es igual a 1, lo que simplifica notablemente la expresión anterior. Pero simplificaciones a un lado, no es descabellado pensar que los planetas del Sistema Solar interior hayan tenido o puedan tener anillos en un futuro. Recordemos que algunos de los grandes impactos que hoy observamos en la superficie de la Luna debieron expulsar material hasta las inmediaciones de la Tierra. En este sentido, hasta hace poco se discutía sobre el posible origen lunar de las llamadas *tectitas*, gotas de roca

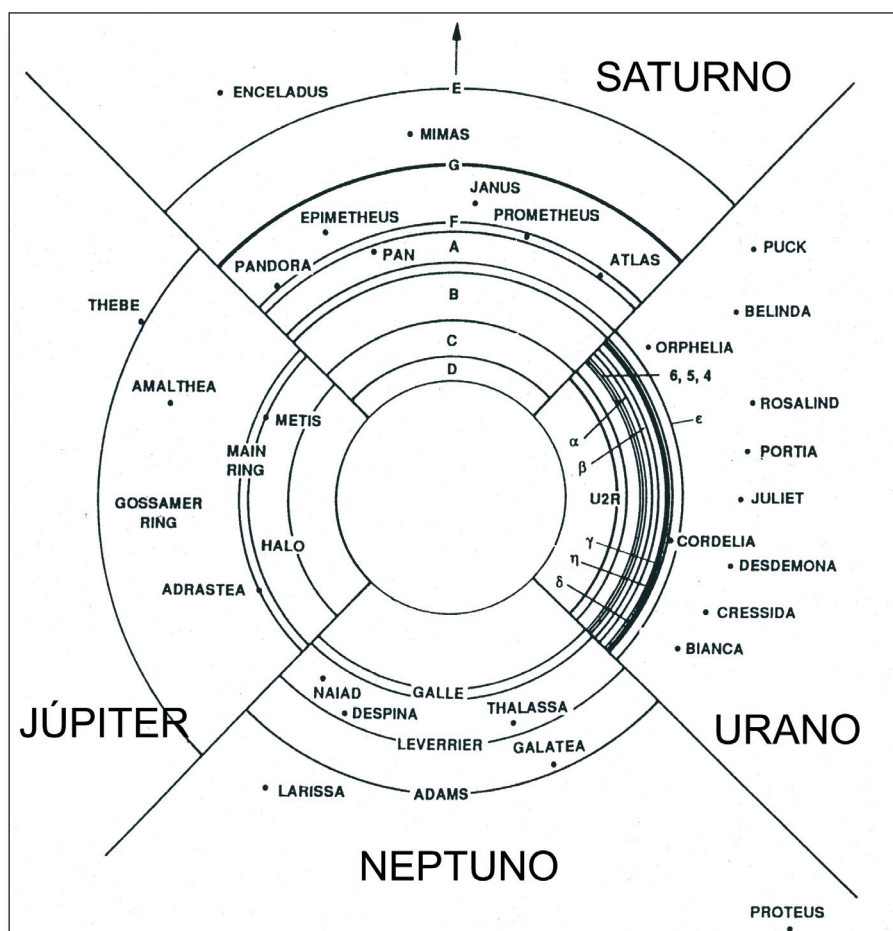
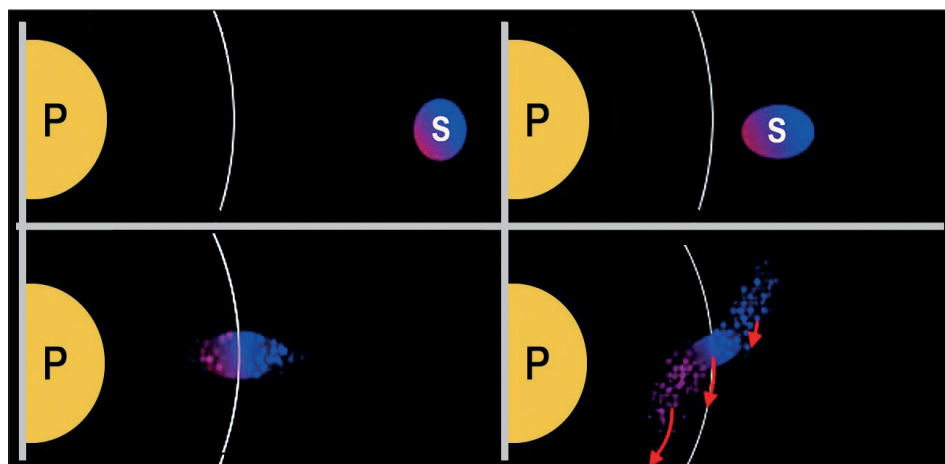


Figura 15.7. Los cuatro sistemas de anillos a escala (Modificado de la Enciclopedia of Planetary Sciences, 1998).

fundida que fueron lanzadas al espacio por los grandes impactos meteoríticos que han golpeado la Tierra. Incluso algunos investigadores han buscado sin éxito un fino anillo alrededor de Marte. Esta búsqueda se fundamenta en el hecho de que Fobos, una de sus dos pequeñas lunas, ya ha rebasado el Límite de Roche marciano y se estima que en unos 100 millones de años caerá sobre el planeta. Las dimensiones de esta pequeña luna (27 x 22 x 19 Km) tampoco debería suponer un problema como fuente de suministro de material para un anillo dado ya que (y sirva de comparación), si concentráramos todas las partículas que forman los exuberantes anillos de Saturno en un solo cuerpo, este no superaría los 100 kilómetros de diámetro... Imaginemos ahora el fantástico espectáculo que podría ofrecer Marte dentro de unos millones de años.

Otros casos igualmente significativos de satélites naturales que mantienen su cohesión más allá de sus Límites de Roche se corresponden con Amaltea, Adrastea y Metis en el sistema de Júpiter; Cordelia, Ofelia, Bianca, Crésida, Desdémona, Julieta, Porcia y Rosalinda en el caso de Urano; y Larisa, Galatea, Nadad, Talasa y Despina en el sistema de Neptuno (Figura 15. 7). El destino de estas lunas es poco alentador: o bien se irán disgregando lentamente por efecto de la tensión mareal y las continuas colisiones de pequeños meteoritos, o bien terminarán sus días impactando contra el planeta entorno al cual orbitan. Algo semejante es lo que le sucedió al cometa Shoemaker-Levy, que, después de



*Figura 15.8. Cuando un cuerpo perfectamente deformable (S) orbita fuera del Límite de Roche de un planeta (P), mantiene una forma perfectamente esférica; pero conforme se va aproximando al planeta tiende a deformarse. Ya dentro del límite (línea blanca) la gravedad no es suficiente para mantener su forma y el cuerpo se rompe por las fuertes tensiones mareales. Las flechas representan la velocidad orbital de los restos disgregados del satélite. Las partículas internas orbitan más deprisa que las exteriores y poco a poco se dispondrán en forma de anillo.*



atravesar el Límite de Roche de Júpiter en 1992, se fracturó en una veintena de trozos que en julio de 1994 colisionaron espectacularmente contra el planeta. Un final apoteósico para un mundo que se atrevió a desafiar el Límite.



## 16. OCÉANOS DE METAL

En el cosmos abundan los fluidos capaces de transportar corrientes eléctricas. La energía liberada en el interior de las estrellas y los cuerpos planetarios por acción de las fuerzas nucleares y la gravedad pueden provocar la agitación térmica de esos fluidos, creando con ello las condiciones favorables para la génesis de campos magnéticos.

En el año 1600, William Gilbert, médico de la reina Isabel I de Inglaterra, publicó el primer tratado sobre magnetismo, *De Magnete*, obra donde compendia de manera sistemática el conocimiento que se tenía sobre el campo magnético terrestre, considerado entonces como el «espíritu de la Tierra». Gilbert diferenció en su tratado los efectos que producen los imanes de los que genera la electricidad; pero en el siglo XVII se observó experimentalmente que un rayo puede imantar una barra de hierro, iniciándose a partir de ese momento una estrecha relación entre el estudio de la electricidad y el magnetismo. El físico y matemático francés André Marie Ampère ideó y construyó hacia 1820 un conjunto de dispositivos y experimentos que demostraban la analogía entre la electricidad y el magnetismo, estableciendo en base a ellos las primeras reglas de la interacción electromagnética; reglas que en 1861 James Clerk Maxwell sintetizaría y unificaría en cuatro ecuaciones que llevan su nombre.

Pero Gilbert se equivocó. El magnetismo no es una propiedad intrínseca de la Tierra, pues responde a un mecanismo universal llamado efecto dinamo. Las características básicas de la dinamo terrestre (geodinamo) se conocen desde los años cincuenta del pasado siglo XX. En el núcleo externo de la Tierra las temperaturas son similares a las de la superficie del Sol (unos 6.000 grados) y las presiones superan el millón de atmósferas. Alrededor del núcleo interno sólido circula un océano de hierro que quintuplica el volumen de la Luna y que conduce la electricidad mejor que el cobre. Bajo la influencia de la rotación este océano generó, hace más de 3.500 millones de años, un incipiente campo magnético que tendió a autointensificarse, y hoy es estable en virtud de una constante retroalimentación mecánica.

Así pues, en líneas generales, la existencia de un campo magnético en un planeta o satélite dependerá de tres factores: composición, energía interna y rotación. En lo que a composición se refiere, en el Sistema Solar podemos encontrar cuatro tipos de cuerpos planetarios diferentes. Los de tipo terrestre (Mercurio, Venus, Tierra, Luna, Marte e Ío) constituidos por materiales que se condensaron a altas temperaturas en la nebulosa solar primigenia, fundamentalmente óxidos, silicatos y hierro metálico. Su alta densidad y los relativamente bajos puntos de fusión que presentan los metales cuando están mezclados con silicatos y sulfuros, nos hacen suponer que estos cuerpos cuentan con núcleos ricos en hierro. Los gigantes de gas (Júpiter y Saturno) tienen hidrógeno como principal constituyente. En condiciones de muy alta presión el hidrógeno alcanza el estado metálico ( $H^+$ ). Protones y electrones se separan entonces y quedan dispersos en el medio, formándose así un plasma conductor de la electricidad. Los gigantes de hielo (Urano y Neptuno) también contienen abundante hidrógeno en su interior atrapado en moléculas de agua ( $H_2O$ ), metano ( $CH_4$ ) y amoníaco ( $NH_3$ ). Por último, los grandes satélites y cuerpos de hielo (Ganímedes, Calisto, Titán, Tritón, Europa y Plutón) contienen una mezcla de hielo y roca. En estos casos el material conductor que puede sustentar una dinamo no es un metal, sino agua salina.

En cuanto a la energía interna, básicamente dos son las causas por la que un material conductor puede encontrarse en estado fluido y en agitación. Por un lado, la gravedad es responsable de las altas presiones que gobiernan en el interior de los planetas gigantes. Bajo presión extrema el enlace químico cambia tan profundamente que emerge una nueva tabla periódica: el potasio se transforma en un metal de transición, el oxígeno en un superconductor y el hidrógeno, gas inerte en condiciones normales, se transforma en un sólido metálico parecido al litio. Esto implica que el elemento número uno, el elemento químico más simple de todos, se desplaza por la tabla periódica hasta convertirse en el metal más abundante del Universo. La segunda causa que condiciona la fusión de los materiales y su agitación es el calor interno, que puede ser de tres tipos: primordial o de acreción, por fricción mareal o por descomposición de elementos radiactivos. En los mundos rocosos que están diferenciados, es decir, en aquellos donde los elementos más pesados (los metales) están en el interior formando un núcleo y los más ligeros se hayan dispuestos en capas externas constituyendo el manto y la corteza, la principal fuente de calor es de origen primordial o de acreción, pues los elementos radiactivos no son siderófilos (no se mezclan con metales) y únicamente pueden concentrarse en la corteza.

El hierro del núcleo, que por encontrarse más caliente es menos denso, tiende a ascender como las burbujas en un cazo de sopa caliente. Cuando alcanza el límite superior del núcleo pierde parte de su calor, pues se lo cede al

manto que tiene encima. El hierro líquido se enfría, se vuelve más denso que el medio circundante y se hunde. Este proceso de transferencia de calor desde el interior hacia el exterior mediante el ascenso y descenso de fluidos más o menos viscosos recibe el nombre de *convección térmica* (Figura 16.1). En aquellos cuerpos donde el interior está demasiado frío o se encuentra homogéneamente caliente (muy caliente en algunos casos), no existe el contraste de densidades y temperaturas necesario para que arranque la convección y se produzca una agitación térmica «ordenada», por lo que la dinamo se apaga.

Pero la composición y la convección no son por sí mismas suficientes para que una dinamo se mantenga activa; es preciso que exista, además, un tercer factor necesario: la rotación. Mediante el efecto *Coriolis* la rotación desvía los fluidos ascendentes del interior forzándoles a seguir una trayectoria helicoidal, como un tirabuzón, que será la piedra angular de la retroalimentación mecánica.

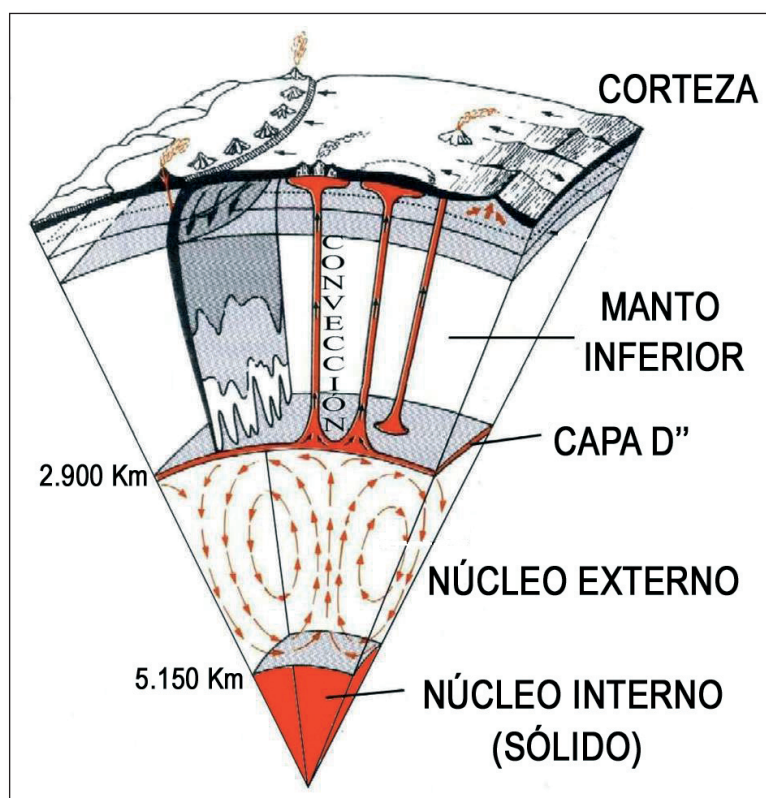


Figura 16.1. Toda la Tierra está en convección. Columnas de material caliente suben desde el núcleo a través de todo el manto, y el material frío baja hasta el núcleo externo desde la superficie (Modificado de Strobach, 1985).



## MAGNETOSFERAS

Los especialistas llaman *magnetosfera* al espacio en torno a un planeta en el que las partículas ionizadas son afectadas por el campo magnético del mismo. Por regla general estas zonas de influencia abarcan una extensión de varios radios planetarios, siendo el mejor ejemplo de ello la magnetosfera de Júpiter que, con una extensión próxima a los 80 radios jovianos (5.700.000 km), destaca por ser la mayor estructura física del Sistema Solar.

En el caso de la Tierra, la magnetosfera se comporta como un paraguas frente al viento solar, un plasma de partículas eléctricamente cargadas que pueden alcanzar velocidades próximas a los 1.000 kilómetros por segundo, impidiendo que esta radiación tan energética alcance la superficie y barra los volátiles presentes en la parte superior de la atmósfera. Sin embargo, algunas partículas logran colarse y son guiadas por las líneas de fuerza del campo hasta las zonas polares, donde se estrellan con las moléculas de aire de la alta atmósfera y las hacen brillar produciendo las conocidas auroras (Figura 16.2). Entre las auroras de la Tierra y las de Júpiter existen dos diferencias sustanciales relacionadas con la magnitud del proceso y con la fuente de las partículas cargadas. Por un lado, las auroras jovianas son más intensas que las de nuestro planeta; y por otro,

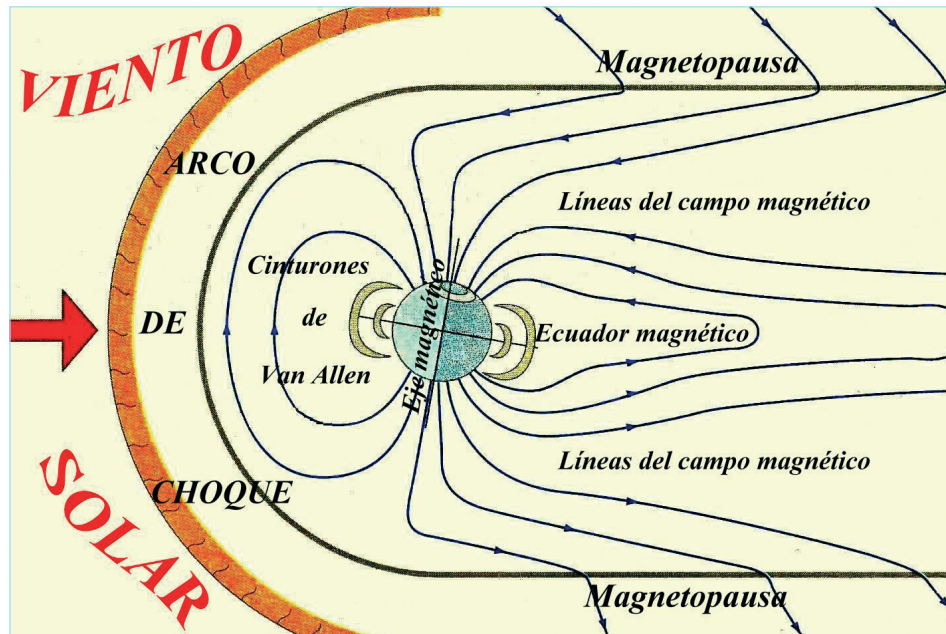
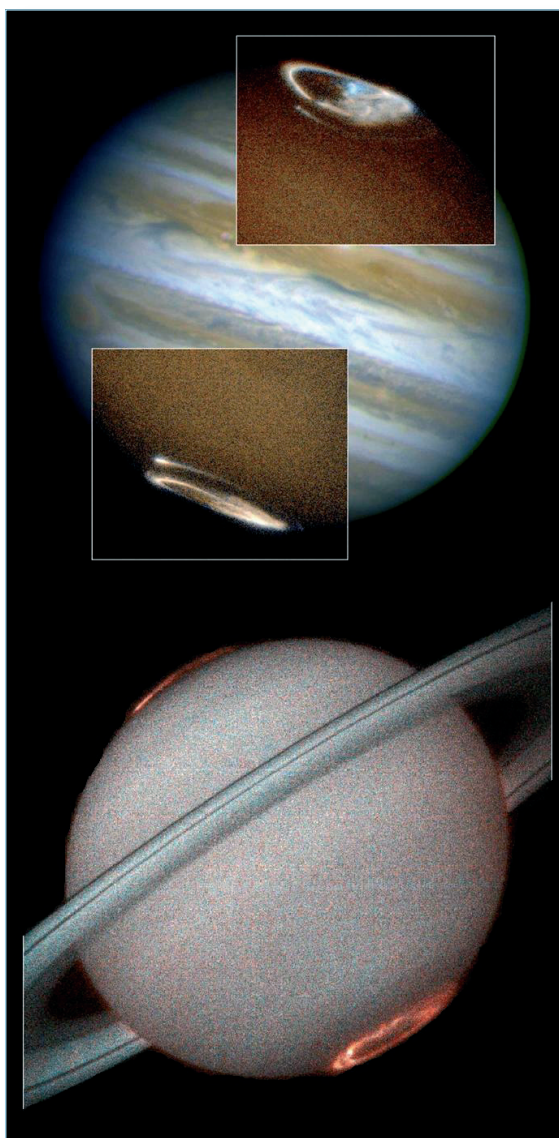


Figura 16.2. Estructura de la magnetosfera terrestre. Cuando el viento solar choca contra ella, las líneas de campo se tensan y deforman adquiriendo aspecto de cometa (Modificado de Tipler, 1993).

*Figura 16.3. Anillos aurales en los polos magnéticos de Júpiter y Saturno. (University of Michigan/JPL/NASA, 1998).*



muchos de los iones que alcanzan la magnetosfera del gigante de gas provienen de Ío, el mundo volcánicamente más activo del Sistema Solar. (Figura 16.3).

Cuando las partículas cargadas se mueven dentro de un campo magnético sus trayectorias tienden a realizar movimientos en espiral alrededor de las líneas de fuerza y a dirigirse hacia los polos magnéticos. Los electrones y protones así acelerados emiten una radiación que depende de la energía de la partícula cargada. En el caso de Júpiter la energía es tan alta que generan una emisión decamétrica: ráfagas de ondas de radio (de 10 m de longitud de onda, de ahí lo de decamétrica) que cada 45 minutos alcanzan nuestro planeta, y que podemos

incluso escuchar con cualquier transistor que capte frecuencias entre los 18 y 24 MHz. Estas ráfagas de emisiones de radio se conocen desde comienzos de los años ochenta y han sido detectadas por las naves *Ulyses*, *Galileo* y *Cassini*.

La comunidad científica no termina de comprender del todo el origen de estas emisiones de radio, aunque las investigaciones más recientes realizadas a partir de los datos recogidos por el telescopio de rayos-x *Chandra*, parecen indicar que proceden del centro del anillo auroral del hemisferio Norte joviano. Actualmente los investigadores se centran en dos hipótesis de trabajo distintas. Por un lado hay quienes opinan que las emisiones están favorecidas por el aporte de iones desde los volcanes de Ío, y estudian la relación entre las posiciones de este satélite respecto al planeta en los momentos de máxima emisión. Y de otro, están quienes sostienen que Júpiter se comporta como una campana gigante, de tal manera que cuando su magnetosfera se ve golpeada por el viento solar ésta resuena a intervalos casi periódicos. Con el fin de contrastar ambas hipótesis los próximos pasos a dar están relacionados con el estudio de los espectros de las emisiones de rayos-x que nos llegan desde este planeta. De obtenerse líneas espectrales de elementos volcánicos como azufre u oxígeno, elementos detectados en las erupciones volcánicas de Ío, se despejarían las dudas sobre la posible implicación de este satélite en el proceso (Figura 16.4).

## EPÍLOGO

¿A qué responde el elevado interés que las agencias espaciales demuestran desde hace décadas por el estudio de los campos magnéticos planetarios? La respuesta es casi evidente: el estudio de los campos magnéticos es una de las actividades científicamente más rentables que una nave espacial puede acometer estando en órbita o al pasar junto a un cuerpo planetario. La información que nos aporta un único instrumento, en este caso un magnetómetro, es asombrosa: nos informa sobre la estructura interna, la composición, la conductividad y estado térmico del cuerpo que analiza. Además, cuando un planeta muestra

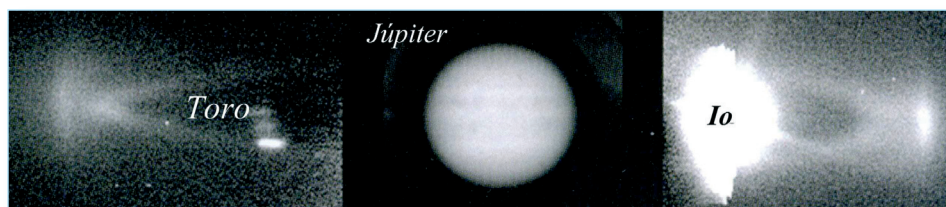


Figura 16.4. Parte del material que emiten los volcanes de Ío escapa al espacio. Las moléculas quedan ionizadas y son atrapadas dentro del campo magnético de Júpiter. Estos iones forman un anillo gigantesco en forma de «dónut» alrededor del planeta, el llamado Toro de Ío (JPL/NASA).

evidencias de magnetismo remanente, como es el caso de Marte o la Luna, podemos inferir a partir de él una parte de su historia geológica. Y por último, porque la génesis de cualquier dinamo, incluida la terrestre, es un proceso de tal complejidad dinámica que cuantos más y mejores ejemplos conozcamos, más fácil será entender los procesos que afectan a los océanos de metal que esconden en su interior los principales cuerpos planetarios del Sistema Solar.

	Campo Magnético (Teslas)	Interpretación
MERCURIO	$2 \times 10^{-7}$	Origen desconocido
VENUS	$< 10^{-8}$ Global	No por dinamo. Remanente
TIERRA	$5 \times 10^{-5}$	Dinamo del núcleo
LUNA	Disperso (de $10^{-9}$ a $10^{-7}$ )	¿Antigua dinamo? ¿Inducido?
MARTE	Disperso (de $10^{-9}$ a $10^{-4}$ )	Antigua dinamo. Bandeados locales
JÚPITER	$4,2 \times 10^{-4}$	Dinamo próxima a la superficie
ÍO	$< 10^{-6}$	Origen complejo.
EUROPA	$10^{-7}$	Inducido. Sustentado por un
GANÍMEDES	$2 \times 10^{-6}$	Posible dinamo
CALISTO	$4 \times 10^{-9}$	Inducido. Sustentado por
SATURNO	$2 \times 10^{-5}$	Dinamo muy profunda
TITÁN	$< 10^{-7}$	En estudio
URANO	$2 \times 10^{-5}$	Dinamo. Profundidad desconocida
NEPTUNO	$2 \times 10^{-5}$	Dinamo. Profundidad desconocida





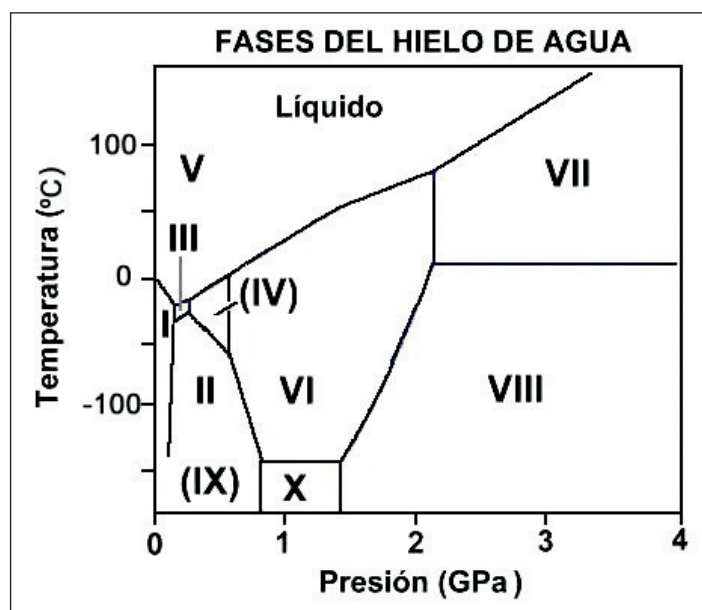
## 17. HIELO I

El tradicional concepto de vulcanismo quedó obsoleto tras el éxito de las misiones *Voyager* y *Galileo*. Hablar hoy de volcanes en el Sistema Solar implica hacerlo tanto de ríos de roca fundida como de agua, nitrógeno, amoníaco y metano en estado líquido. El proceso de emisión de estos gélidos magmas recibe el nombre de criovulcanismo, y ha sido observado en las lunas del Sistema Solar exterior. Sin embargo, la reciente detección de cristales de hielo de agua en la superficie de Quaoar, un pequeño objeto descubierto en el Cinturón de Kuiper, ha puesto en evidencia que más allá de Plutón, en los arrabales de nuestro sistema planetario, este proceso geológico también es posible.

El Sistema Solar se formó tras el colapso y la contracción de una densa nube interestelar de gas y polvo. Inmediatamente después del colapso, el 99 % de la masa se concentró en el centro por acción de la gravedad, formando una protoestrella de la que más tarde nacería el Sol. El resto de la nube experimentó entonces un lento enfriamiento que permitió la progresiva condensación de los diferentes componentes químicos del sistema. Los primeros en aparecer fueron los elementos con temperaturas de condensación próximas a los 2.000 grados Celsius (°C), como el aluminio, el silicio y el hierro. Lejos del centro de la nube, en las fronteras del incipiente sistema planetario, se fueron concentrando aquellos elementos y moléculas que sólo se condensan a bajas temperaturas, como el hidrógeno, el oxígeno, el carbono y el nitrógeno. Este enfriamiento diferencial explica por qué en las proximidades del Sol sólo existen cuerpos rocosos mientras que en la periferia abundan los cuerpos constituidos por volátiles en forma de exóticos hielos. Millones de estos gélidos mundos se encuentran almacenados a más de 50 unidades astronómicas (UA), en dos regiones conocidas como Cinturón de Edgeworth-Kuiper y Nube de Oort. Allí, en penumbra, con temperaturas ambientales próximas al cero absoluto, permanecen intactos desde su formación hace 4.500 millones de años.

## EXTRAÑOS CUBITOS DE HIELO

El hielo de agua cuenta con dos propiedades que nos son familiares por ser fáciles de observar en la naturaleza: se presenta organizado en una estructura cristalina y flota en el agua. El agua helada puede flotar sobre la líquida porque al solidificarse incrementa su volumen, lo que a su vez provoca una significativa disminución de la densidad. Pero el camino inverso también es posible, por lo que un aumento significativo de la presión provocará un descenso de la temperatura de fusión del hielo. Así, si pudiéramos someter a un cubito de hielo de nuestro congelador a una elevada presión, lograríamos tener agua en estado líquido por debajo de los 0 °C. Este efecto no es fácil de observar, pues hay que incrementar unas 100 veces la presión atmosférica normal para que el punto de fusión del hielo de agua pura descienda sólo un grado. A presiones más altas, sin embargo, se forman diversas variedades alotrópicas (misma composición pero diferente estructura cristalina) del hielo, cada una de ellas con unas propiedades físicas y termodinámicas muy concretas y características. Estas variedades del hielo de agua se identifican con números romanos: Hielo II, Hielo III, Hielo IV..., siendo el hielo ordinario de nuestro congelador el Hielo I (Figura 17.1). Bajo condiciones normales de presión, el Hielo I de agua pura mantiene su estructura cristalina siempre que se encuentre por encima de los -138 °C. A temperaturas inferiores se vuelve amorfo, aumenta su densidad y deja de flotar.



**Figura 17.1.**  
*Diagrama de fases del hielo de agua. Los números romanos identifican cada una de sus variedades alotrópicas (misma composición pero diferente estructura y propiedades). La presión viene indicada en Gigapascals (GPa).*

## HIELO I EN QUAOAR

Desde 1992, año en que se descubrió el primer objeto del Cinturón de Edgerworth-Kuiper, los astrónomos han localizado más de 800 de estos cuerpos en una región donde la temperatura no supera los  $-200^{\circ}\text{C}$ . Debido a su pequeño tamaño (salvo notables excepciones, la mayoría se encuentra por debajo de los 500 Km de diámetro) y a la distancia a la que se encuentra (unas 50 UA, es decir, 50 veces la distancia media que separa nuestro planeta del Sol), conseguir determinar la composición de cualquiera de ellos puede considerarse una verdadera proeza científica y tecnológica.

Los modelos teóricos indican que estos cuerpos deben estar formados por algo de rocalla y diversos compuestos químicos helados, entre ellos el agua. Uno de los cuerpos en los que se ha detectado la presencia de agua es Quaoar, uno de los objetos de mayor tamaño descubierto en el Sistema Solar desde que en 1930 Clyde Tombaugh descubriera Plutón<sup>1</sup>. Con un diámetro estimado de 1.300 kilómetros, Quaoar es mucho mayor que cualquiera de los asteroides del cinturón principal y que muchas de las lunas que orbitan en torno a los gigantes de gas.

El 9 de Diciembre de 2004 la revista *Nature* publicó los resultados de una investigación liderada por David C. Jewitt, del Instituto de Astronomía de la Universidad de Hawai. Los autores del artículo aseguraban haber detectado trazas de cristales de agua helada (Hielo I) y de hidrato de amonio en la superficie de Quaoar. Dado que el hielo de agua no puede mantener una estructura interna coordinada en la superficie de un cuerpo tan frío, su presencia sólo puede estar asociada a algún tipo de proceso geológico reciente, y en este sentido sólo caben dos posibilidades: o bien han sido emitidas desde el interior por algún episodio reciente de criovulcanismo, o bien parte de la corteza ha sido recientemente excavada y calentada por la acción de un impacto meteorítico. La opción volcánica no implica necesariamente que Quaoar cuente con la energía interna suficiente como para desencadenar violentas erupciones de agua líquida. El escenario podría ser bien distinto: la mezcla de hielos de agua con amoniaco genera compuestos menos densos que el hielo de agua pura a muy bajas temperaturas, lo que en principio debe provocar movimientos ascendentes de estos materiales desde su interior. Una vez en el exterior, y en condiciones de baja gravedad, podrían comportarse de forma similar a un magma de gran viscosidad, derramándose lentamente por la superficie de Quaoar.

---

1. En el momento de redactar este capítulo el récord lo ostenta el objeto 2003 UB313, extraoficialmente llamado Xena. Recientes estimaciones (*Science*, Vol. 311, pg. 589) indican que este cuerpo es, con 3.000 Km de diámetro, unos 700 Km mayor que Plutón.

Estas conclusiones no son definitivas. Por un lado, los análisis que apuntan hacia la existencia de cristales de hielo de agua deben ser contrastados por otros investigadores; y por otro, los rangos de temperaturas a la que el hielo mantiene su estructura cristalina puede no ser la misma en los experimentos de laboratorio que en las severas condiciones del espacio. En cualquier caso, sabernos capaces de detectar procesos geológicos de esta naturaleza en un cuerpo tan frío y distante como Quaoar (Figura 17.2) nos hace ser optimistas respecto a la posibilidad de llegar a detectar algún día, en un futuro no muy lejano, procesos similares en un planeta que no pertenezca al Sistema Solar.



*Figura 17.2. Quaoar es mucho más pequeño que la Luna o Plutón. En la figura también aparece Sedna, uno de los mayores objetos descubiertos hasta el momento en el Cinturón de Kuiper (NASA-JPL-Caltech).*

## 18. FORMA Y ARMONÍA

En el Sistema Solar no abundan las esferas perfectas. Los cuerpos planetarios, incluida la Tierra, se asemejan más a esferoides achatados que a gráciles pompas de jabón. ¿A qué se debe tan peculiar morfología? En líneas generales, cuatro son los factores que parecen controlar la forma de planetas y satélites: la velocidad de rotación, el equilibrio hidrostático, las fuerzas de marea y el estado térmico.

El primer científico que intuyó y explicó satisfactoriamente la forma de la Tierra fue Isaac Newton. En la Proposición XVIII, Teorema XVI, de sus *Principios Matemáticos de Filosofía Natural* (1687), el físico inglés asevera de forma tajante que «los ejes de los planetas son menores que los diámetros trazados perpendicularmente a dichos ejes»; o en otras palabras: los planetas se asemejan a esferoides de polos achatados.

Para respaldar esta afirmación Newton se sirvió de tres argumentos, dos teóricos y uno observacional. En el primero sostiene que «de suprimir todo movimiento circular diario (es decir, la rotación) los planetas deberían adoptar la figura esférica debido a la igual gravedad de las partes de todos lados». O lo que es lo mismo: un sólido sin rotación no se verá sometido a una fuerza centrífuga que tienda a abombar su ecuador como si de una peonza se tratara. En su segundo argumento hace referencia al comportamiento de un fluido en rotación, afirmando que «si la materia fuese fluida, al estar en rotación, aumentaría los diámetros ecuatoriales mientras disminuiría hacia los polos». Y por último, ante la falta de una imagen global de nuestro planeta que le permita corroborar sus ideas, Newton decide emplear una herramienta intelectual completamente novedosa en ciencia: la planetología comparada. Así, con el objetivo de dar más fuerza a sus argumentos, recurre a observaciones astronómicas que demuestran que Júpiter «se ve más corto entre los polos que de oriente a occidente», y razonando que si Júpiter se encuentra achatado por los polos y su ecuador es deforme... ¿por qué no la Tierra?

Hoy, más de tres siglos después, sabemos que estas tres afirmaciones son básicamente correctas aunque ciertamente incompletas. Entremos en detalles.



## EQUILIBRIO Y ROTACIÓN

Si pudiéramos contemplar el giro de un cuerpo planetario en el espacio durante varios cientos de millones de años, comprobaríamos que a escala de tiempo geológico éste se comporta como un fluido en rotación. Este comportamiento se puede explicar mediante la llamada ecuación hidrostática, una expresión matemática que pone en relación cuatro parámetros: la presión en el interior de un cuerpo ( $P$ ), su densidad ( $\rho$ ), la gravedad ( $g$ ) y la profundidad ( $z$ ).

$$P = \rho \cdot g \cdot z$$

De esta sencilla ecuación (aquí simplificada) se deduce que la presión en el interior de los planetas y satélites se incrementa rápidamente con la profundidad (sólo se tiene en cuenta este factor porque tanto la densidad como la gravedad son propiedades intrínsecas del cuerpo y, por lo tanto, podemos considerarlos constantes). Para cuerpos con densidades medias globales comprendidas entre 5,5 y 3,0 g/cm<sup>3</sup>, una vez alcanzados los 400 kilómetros de profundidad, los materiales se deforman y comportan como fluidos muy viscosos. Pero, ¿por qué tienden estos fluidos viscosos hacia la esfericidad?

En un espacio sin restricciones, homogéneo, sin direcciones privilegiadas, o cuando todas las direcciones son igualmente probables, se dice que existe isotropía. La mayor parte del Cosmos es un espacio vacío, es decir, isótropo. Cuanto más homogéneo es, más probable es la emergencia de una esfera, pues esta es la configuración de menor energía potencial gravitatoria y la menor superficie que encierra un volumen dado. Si a escala geológica los planetas se comportan como un fluido muy viscoso en el vacío, podemos afirmar entonces que su forma tenderá a la esfericidad. Sin embargo, como bien dedujo Newton, esta tendencia puede verse alterada a causa de la rotación.

En resumen: un fluido en rotación en el interior de un medio isótropo tenderá a la esfericidad siempre que la fuerza gravitatoria que mantiene cohesionado el cuerpo se vea compensada por la fuerza centrífuga (de la rotación) que tiende a su expansión. Podemos afirmar entonces que la forma de un cuerpo planetario dependerá, en último término, de su velocidad de rotación, una hipótesis que podemos contrastar comparando ésta con las diferencias entre los radios polares y ecuatoriales (ver tabla). Y así parece: Mercurio y Venus, los planetas más lentos, son esferas casi perfectas; mientras que la Tierra y Marte, que giran con velocidades mucho más altas, presentan deformaciones ecuatoriales significativas. Sin embargo, los valores de abombamiento ecuatorial más acusados les corresponden a los gigantes de gas, cuyos interiores invierten de 10 a 16 horas en efectuar una rotación completa, un giro ciertamente vertiginoso.

PLANETAS	DIFERENCIA DIÁMETRO ECUATORIAL Y POLAR (Km)	VELOCIDAD ROTACIÓN (días)	DENSIDAD (g/cm <sup>3</sup> )
Mercurio	0	58,6	5,4
Venus	0	243,0	5,2
Tierra	42	1,0	5,5
Marte	44	1,0	3,9
Júpiter	9.276	0,4	1,3
Saturno	11.810	0,4	0,7
Urano	1.172	0,7	1,3
Neptuno	846	0,8	1,6

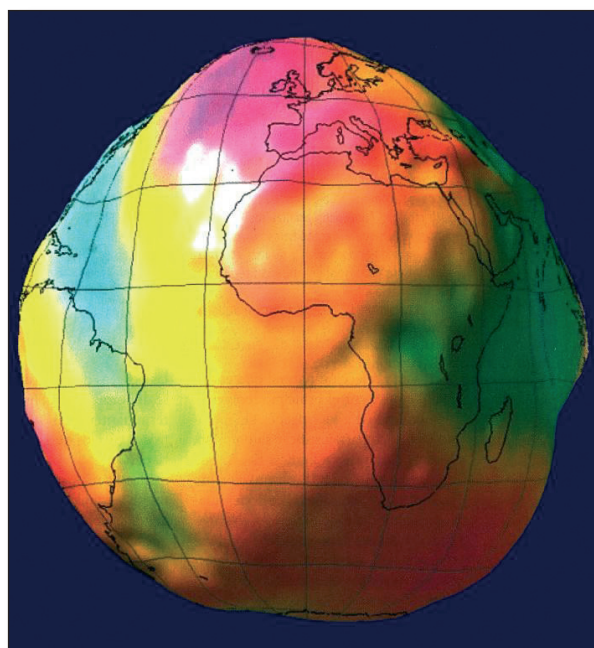
## EL JUEGO DE LAS MAREAS

¿Qué sucede entonces con la forma de los asteroides y satélites? Los primeros, a pesar de que generalmente cuentan con elevados períodos de rotación, suelen ser cuerpos de aspecto bastante irregular debido a su pequeño tamaño y baja densidad. Tal vez Ceres, Palas y Vesta, que cuentan con diámetros superiores a los 500 Km y densidades próximas a los 3,0 g/cm<sup>3</sup> sean los asteroides que más tiendan a la esfericidad.

En el caso de las lunas, sin embargo, entra en juego un nuevo factor capaz de controlar su morfología: las mareas. Muchos satélites presentan un aspecto abombado en su ecuador debido, no ya a la rotación, que en casi todos los casos es muy lenta pues se encuentra capturada y coincide con el período de traslación, sino a las fuerzas mareales que sobre ellos ejercen tanto los planetas como otros satélites cercanos. En el caso concreto de la Luna, ésta experimenta periódicas deformaciones en su región ecuatorial debido a la acción de la gravedad terrestre. Estos esfuerzos desencadenan deformaciones y temblores de baja intensidad en el interior del satélite, pequeños terremotos que los sismógrafos dejados por las misiones Apolo lograron registrar.

## EL ESTADO TÉRMICO

Pero si la Tierra no es una esfera perfecta, ¿a qué figura geométrica se parece entonces? Los geofísicos denominan geoide a la forma que tendría nuestro planeta si éste se encontrara completamente cubierto por una masa de agua en calma (Figura 18.1). Pero esta forma de referencia tampoco es del todo perfecta, pues presenta algunas deformaciones que atestiguan que el interior del planeta es muy dinámico. Actualmente sabemos que los abombamientos del geoide se



*Figura 18.1. Aspecto del geoide terrestre exagerado en un factor de 50.000 para así poder apreciar mejor las grandes deformaciones e irregularidades del planeta. Como podemos observar, la Tierra dista mucho de ser una esfera perfecta (En Cazenave y Le Mur, 1998).*

corresponden con zonas calientes del manto y penachos de material que ascienden directamente desde el núcleo, como el punto caliente de las islas Hawai; mientras que las áreas deprimidas se identifican con regiones donde la corteza del planeta es más fría y pesada, como es el caso de la Fosa de las islas Marianas.

Sin embargo, la última sorpresa sobre la compleja forma de la Tierra nos la han proporcionado en las últimas dos décadas los datos registrados por los satélites geodésicos: el achatamiento de las regiones polares está disminuyendo. Al parecer este fenómeno no está relacionado con cambios en la rotación o el estado térmico del interior del planeta, sino con una redistribución de masas en la superficie terrestre que se inició hace unos 20.000 años, cuando el grueso manto de hielo que durante la última glaciación cubría el hemisferio norte comenzó a descongelarse. La rápida fusión del casquete glaciar produjo una relajación del manto terrestre, que durante la glaciación debía encontrarse comprimido por el sobrepeso a que la gran masa de hielo lo sometía. Esta descompresión fue acompañada de una elevación del terreno que todavía prosigue hoy en día, y que es la responsable de una paulatina disminución del achatamiento de la Tierra... Un peculiar cambio de forma y armonía que no viene sino a corroborar que vivimos en un mundo más complejo y dinámico de lo que sospechamos.

## 19. HACIA LA HELIOSFERA

Vivimos en el interior de una enorme burbuja, pero nadie conoce con seguridad hasta dónde se extiende o cómo son sus límites. Un pequeño ingenio mecánico lanzado hace treinta años se dirige a toda velocidad hacia esta frontera con la intención de alcanzar el espacio interestelar, el más allá de nuestro sistema planetario. Esta nave se encuentra en la heliopausa, una discontinuidad brusca donde se desarrollan fenómenos físicos intrigantes y desconocidos sobre los que sólo podemos especular.

La apuesta era fuerte. En septiembre de 1977 nadie sabía cuánto podrían durar o si completarían con éxito su ambicioso viaje. Los planes originales de la NASA contemplaban el lanzamiento de las últimas cuatro naves de la serie *Mariner* con la intención de explorar todo el Sistema Solar exterior, incluido Plutón. Finalmente la flotilla se redujo a la mitad y los ingenios automáticos que quedaron, por entonces conocidos como *Mariner-Jupiter-Saturn* 1977, fueron rebautizadas con su nombre actual: *Voyager 1* y *Voyager 2*.

La misión fue diseñada para aprovechar una alineación planetaria que podría permitir el viaje a los cuatro gigantes de gas empleando poca cantidad de combustible y en un tiempo récord. Esta peculiar distribución geométrica que sólo se repite cada 175 años permite a una sonda seguir una trayectoria que la haga impulsarse sin necesidad de costosos y complejos sistemas de propulsión. El sobrevuelo de cada planeta modifica la trayectoria de la nave y añade un empujón gravitatorio que permite llevarla a su próximo destino. Gracias a esta técnica, demostrada por primera vez con la misión *Mariner 10* hacia Venus y Mercurio, el tiempo de vuelo hasta Neptuno se redujo de 30 a 12 años. Se estudiaron más de 10.000 posibles trayectorias antes de elegir las dos que llevarían a los «viajeros» a las cercanías de Júpiter y Saturno. En el caso de la *Voyager 1*, su acercamiento a Titán la obligó a tomar el camino hacia el Norte del plano de la eclíptica, impidiéndola visitar más planetas. El coste del sacrificio era asumible, pues su gemela *Voyager 2* gozaba de buena

salud y tras algunos reajustes (algunos fueron verdaderamente heroicos, como la reprogramación desde la Tierra del ordenador principal) podría alcanzar Urano y Neptuno en apenas una década.

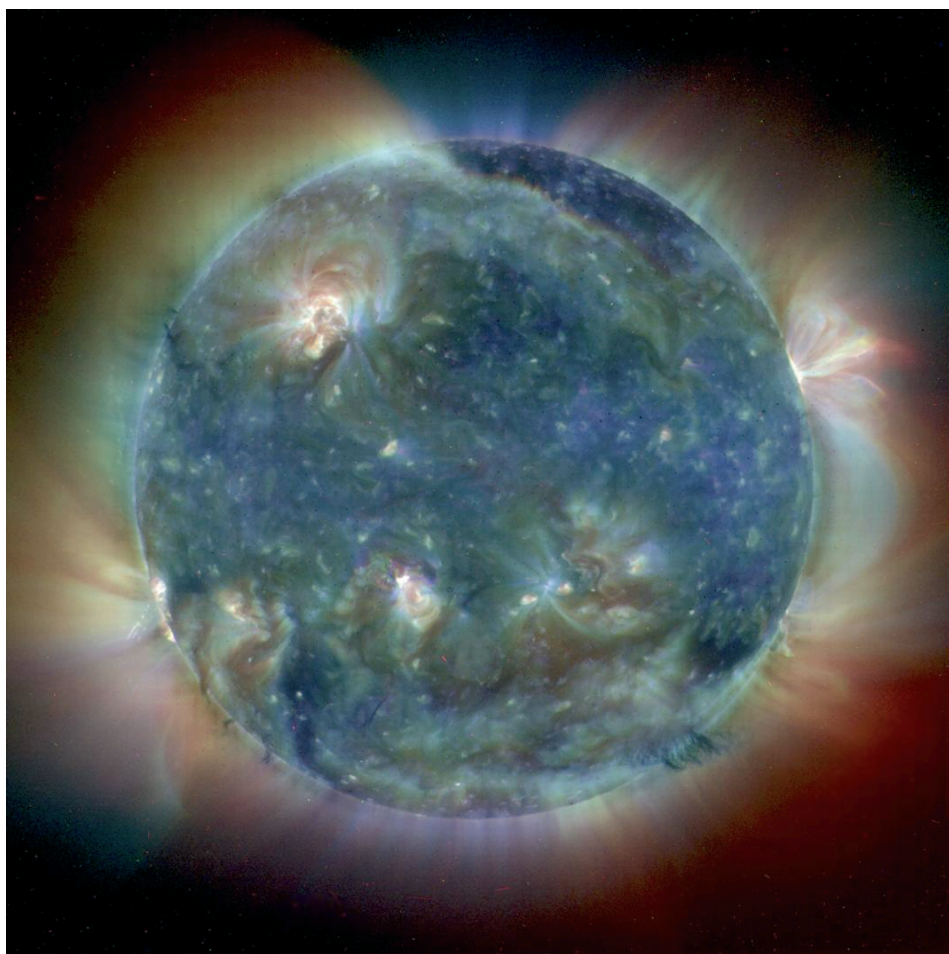
Debido a su peculiar trayectoria *Voyager 1* es hoy el artefacto construido por el hombre más veloz y que más lejos ha llegado. A la vertiginosa velocidad de 1,6 millones de kilómetros al día, esta nave se encuentra en el borde mismo del Sistema Solar. Pero en su camino hacia las estrellas ha tenido que superar una última prueba: atravesar el borde de la enorme burbuja en la que nos encontramos inmersos.

## EN LA BURBUJA

En el interior del Sistema Solar el espacio no está vacío, sino repleto de partículas cargadas que emanan del Sol y fluyen velozmente en continuo torrente que con frecuencia sopla en ráfagas repentinas. Este flujo de electrones, protones y otras partículas atómicas recibe el nombre de *viento solar*, y se expande por el espacio interplanetario llevando consigo líneas de fuerza de campo magnético que forman un patrón espiral a medida que el Sol gira sobre sí mismo cada 27 días. Su velocidad está comprendida entre los 300 y 750 kilómetros por segundo (tiende a aumentar con la distancia y la actividad de la estrella), y su densidad es de unos 5 millones de partículas por metro cúbico en las inmediaciones de la Tierra. La cascada de iones y el campo magnético solar que llevan consigo producen una ingente cavidad esférica en el medio interestelar, una enorme burbuja que sobrepasa la órbita de los cuerpos más distantes del sistema. Esta gigantesca región semiesférica dominada por el Sol recibe el nombre de heliosfera.

Cabría imaginar que conforme se aleja del Sol la heliosfera irá desvaneciéndose poco a poco hasta convertirse en una frontera difusa donde las partículas del viento solar se mezclan con la brisa interestelar. Pero no es así. En su avance se expande hasta cubrir un volumen cada vez mayor, formando una capa tan fina y tenue (entre 0,1 y 10 átomos por centímetro cúbico) que ya no es capaz de empujar contra la pequeña presión que ejerce el tenue medio cósmico. Llegado a ese punto, el viento solar no decelera de modo paulatino, sino que sufre un violento y repentino frenazo en el que pierde aproximadamente el 75% de su velocidad. La energía cinética del viento se convierte parcialmente en calor, y hace que la temperatura del plasma aumente hasta alcanzar un millón de grados. Otra parte se gasta en comprimir el campo magnético que venía arrastrando desde las inmediaciones del Sol. Esta región donde el chorro de partículas procedente de la corona solar cambia velocidad por calor, turbulencia y compresión, recibe el sugerente nombre de choque terminal.





*Figura 19.1. El Sol visto en la longitud de onda del ultravioleta por el telescopio SOHO. La corona solar es una capa de gas altamente ionizado y caliente (unos dos millones de grados Kelvin) que rodea al Sol. De ella procede el viento solar, un flujo de electrones, protones y otras partículas atómicas que viajan a gran velocidad hasta una distancia superior a 110 UA (SOHO/Extreme Ultraviolet Imaging Telescope).*

Tras el choque terminal el viento solar va frenando poco a poco hasta llegar a la heliopausa, donde choca directamente con el viento interestelar procedente de la región de la galaxia en la que nos encontramos. Éste lo constituyen electrones, protones, todos los núcleos pesados desde el helio al uranio (generados por las explosiones de estrellas moribundas) y demás partículas que viajan a la velocidad de la luz y parecen poblar todas las zonas del universo. La localización de la heliopausa no es fija, sino que varía tanto con el ciclo de actividad solar como con los propios cambios que sufre el viento cósmico. Algunos investigadores creen que a escalas de tiempo muy grandes éste puede llegar a presionar la heliopausa y afectar incluso a la climatología terrestre.

## AMENAZA ESTELAR

¿Cómo puede afectar la radiación estelar al clima de la Tierra? El secreto está en las supernovas. El arsenal nocivo que puede llegar a desplegar una estrella al final de sus días es más que respetable: radiación ultravioleta, rayos-x y gamma, neutrinos y rayos cósmicos. El poder de estos rayos es inmenso; una simple partícula atómica de un haz cósmico puede tener suficiente energía para elevar a una persona a 3 centímetros del suelo. Afortunadamente, cuando estos rayos inciden sobre la atmósfera superior su energía se disipa al fragmentar átomos del aire, produciéndose una cascada de partículas subatómicas de menor energía. Habitualmente éstas llegan al suelo en forma de una «lluvia» suave que no constituye ninguna amenaza para la vida.

Un fuerte incremento en el flujo de rayos cósmicos en los niveles altos de la atmósfera aceleraría la producción de óxido nitroso (NO), molécula que actúa como catalizador en la destrucción de moléculas de ozono (O<sub>3</sub>). La capa

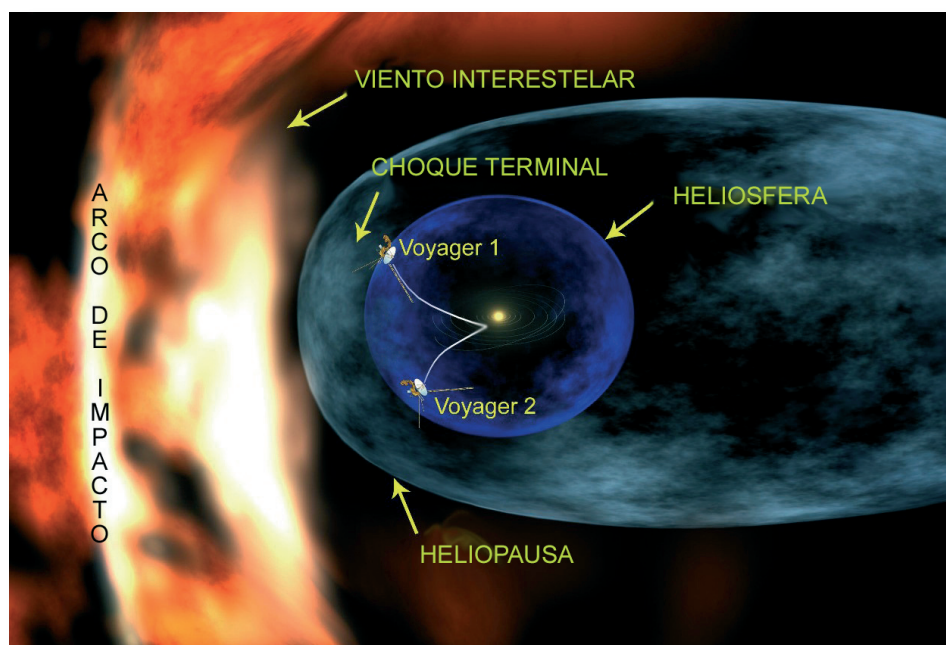


Figura 19.2. Aún no sabemos con seguridad dónde termina la influencia solar. Nuestra estrella se comporta como un gigantesco corazón de energía que palpita a un ritmo de 11 años, y a ese ritmo el viento solar se expande por el espacio y crea una burbuja magnetizada de plasma caliente llamada heliosfera. La superficie donde el viento solar cae bajo la presión de la radiación estelar recibe el nombre de choque terminal, y ocupa unas 75-90 UA. Algo más lejos, donde entran en contacto los iones solares y los de la Galaxia, se sitúa la heliopausa. Ésta se mueve y deforma a través del medio interestelar local creando un arco de impacto al frente que podría oscilar de 110 a 230 UA (JPL/NASA).

de ozono de la atmósfera nos protege de la radiación ultravioleta del Sol, por lo que una disminución sensible de la misma podría llegar a producir un grave perjuicio para la biosfera. Conscientes de que esta es una amenaza real, tanto para nuestro planeta como para futuras misiones tripuladas a la Luna o Marte, en enero de 2005 la agencia espacial estadounidense anunció la aprobación del proyecto IBEX (Interstellar Boundary Explorer), una pequeña nave que a partir de 2008, y desde las inmediaciones de nuestro planeta, se dedicará a cartografiar la heliopausa y estudiar el flujo de rayos cósmicos que alcanzan el Sistema Solar interior.

Mientras, la sonda *Voyager 1* prosigue su viaje. Goza de buena salud y continúa enviando datos desde una distancia de 14.000 millones de kilómetros. Los investigadores creen que ha rebasado ya la heliopausa y en los próximos años podría tomar medidas directas del frente de choque con el medio galáctico. Sin embargo, la NASA ha anunciado que no dispone del presupuesto que permita mantener abiertos indefinidamente los canales de comunicación con la nave... Quizá la próxima vez que intente llamar a casa descubra que la hemos abandonado en su viaje hacia las estrellas.



## IV. SIDEREUS

*«Harto más merecedores de predilección para el maestro avisado serán aquellos discípulos un tanto indómitos, desdeñosos de los primeros lugares, insensibles al estímulo de la vanidad, que, dotados de rica e inquieta fantasía, gastan el sobrante de su actividad en la literatura, el dibujo, la filosofía y todos los deportes del espíritu y del cuerpo. Para quienes los sigue de lejos parece como que se dispersan y se disipan, cuando en realidad, se encauzan y fortalecen. Corazones generosos, poetas a ratos, románticos siempre, estos jóvenes distraídos poseen dos cualidades esenciales que el maestro puede sacar gran partido: desdén por el lucro y las altas pasiones académicas, y espíritu caballeresco enamorado de altos ideales. Al revés de los otros, al abandonar las aulas es cuando realmente comienzan a estudiar. Y no es raro verlos fatigados ya de elaborar sin provecho, y faltos de orientación definida, presentarse en los laboratorios en súplica de consejos técnicos y de un tema de estudio. Y algunos de ellos logran encauzarse y triunfar»*

**Santiago Ramón y Cajal**  
Los Tónicos de la Voluntad, 1898





## 20. LA ROCA DEL GÉNESIS

La Luna es un mundo inerte y desolado. A pesar de ello, desde hace siglos, los astrónomos vienen siendo testigos de ciertos cambios puntuales y efímeros que tienen lugar en su superficie. Conocidos con las siglas LTP (de Lunar Transient Phenomena), estos fenómenos lunares transitorios podrían ser la prueba de que la vieja corteza del satélite aún experimenta algún tipo de actividad geológica. Unos hablan de colisiones de meteoritos y cometas, otros de extraños efectos de la luz solar, incluso se ha llegado a proponer la posible existencia de algún tipo de manifestación volcánica... Un apasionante misterio al que deberá enfrentarse la próxima generación de exploradores lunares.

*«De todos los objetos del Sistema Solar, la Luna es probablemente el único que no ha sido alterado desde su formación. En realidad, la Luna es el único cuerpo grande accesible cuya superficie nos hace regresar a los comienzos del Sistema Solar».*

Con estas palabras comenzaba el investigador Harold Urey un histórico informe, fechado el 23 de marzo de 1959, con el que instaba a una recién nacida NASA<sup>1</sup> a considerar la Luna como un objetivo de primer orden en la carrera espacial. El argumento era claro y directo: la Luna es un mundo fósil en cuya superficie aún se conservan las páginas perdidas que le faltan al libro de la historia de la Tierra, las llamadas rocas del Génesis.

La idea de que nuestro satélite es un cuerpo geológicamente muerto se consolidó en la década de los setenta, tras las misiones Apolo. La ausencia de atmósfera y de energía interna significativa garantiza que nada puede perturbar su paz...Al menos en teoría

---

1. La agencia gubernamental norteamericana responsable de la investigación aeronáutica civil y la exploración espacial, popularmente conocida con el acrónimo NASA (abreviatura de National Aeronautics and Space Administration) fue fundada en 1958 sustituyendo a la NACA (National Advisory Committee for Aeronautics).

## DUDAS RAZONABLES

A mediados del siglo XIX se concitó entre los astrónomos europeos una interesante controversia sobre un posible cambio en la forma del cráter Linneo, situado en el corazón de Mare Serenitatis. La primera comunicación al respecto fue realizada por el astrónomo Julio Schmidt, entonces director del Observatorio de Atenas, quien en una carta dirigida a M. Birt, de la Real Sociedad Astronómica de Londres, exponía:

*«Desde hace algún tiempo he observado que un cráter de la Luna, situado en el Mar de la Serenidad, no es ya visible; este cráter llamado Linneo por Maedler, está designado con la letra A en el mapa de Lohrman. Lo conozco desde 1841, y no era difícil de distinguir, aún cuando estuviese la Luna en su lleno. En octubre y noviembre de 1866, un día antes de la salida del Sol por su horizonte, el cráter había desaparecido completamente. En su lugar sólo se veía una mancha blancuzca».*

Esta primera controversia astrogeológica fue popularizada por el astrónomo y divulgador científico francés Camille Flammarion, quien participó activamente en la misma. Después de una exhaustiva campaña de observación, varios astrónomos profesionales presentaron una comunicación ante la Academia de Ciencias de París en la que afirmaban, con todo convencimiento: *«Es la primera vez que se habrá probado con exactitud la existencia de acciones geológicas en la superficie de la Luna»*. Sin embargo, a pesar de los esfuerzos de los defensores pro-actividad, la controversia poco a poco se fue diluyendo. A ello contribuyó decisivamente la entrada en escena de uno de los más prestigiosos astrónomos de la época: Urbain Jean Joseph Le Verrier<sup>2</sup>, entonces director del Observatorio de París. Le Verrier zanjó el asunto concluyendo que el cráter Linneo (Linne es su nombre oficial) era un punto de la orografía lunar mal conocido, por lo que no era posible reconocer con certeza ningún tipo de variación.

El análisis comparativo de mapas de diferentes épocas no pudo arrojar luz sobre el problema, pues los rasgos geográficos registrados en ellos no se encuentran fotografiados, sino delineados. En estas primeras cartas lunares los accidentes del terreno ocupan sus posiciones selenográficas «exactas»,

---

2. El astrónomo francés Le Verrier era un especialista en el cálculo de órbitas. A la edad de 30 años abordó el cálculo de la órbita exacta de Urano (descubierto en 1781 por William Herschel), en la que encontró anomalías. Éstas le llevaron a predecir la existencia de otro planeta aún más lejano, e incluso a calcular su posición. En 1846 envió sus datos a Johann Gottfried Galle, del observatorio de Berlín, quien el 23 de septiembre de ese mismo año halló el planeta Neptuno, después de sólo una hora de búsqueda y a un grado de distancia del punto indicado por Le Verrier.

pero en ellas nada se dice sobre su aspecto. Así pues, asegurar que se había producido un cambio en la morfología de un cráter, sin contar con la más mínima prueba gráfica objetiva, ponía en entredicho la reputación de los observadores. Le Verrier optó por la vía diplomática, dictaminando que el efecto observado podía deberse al complejo movimiento de libración<sup>3</sup> lunar, o estar relacionado con algún tipo de aberración óptica.

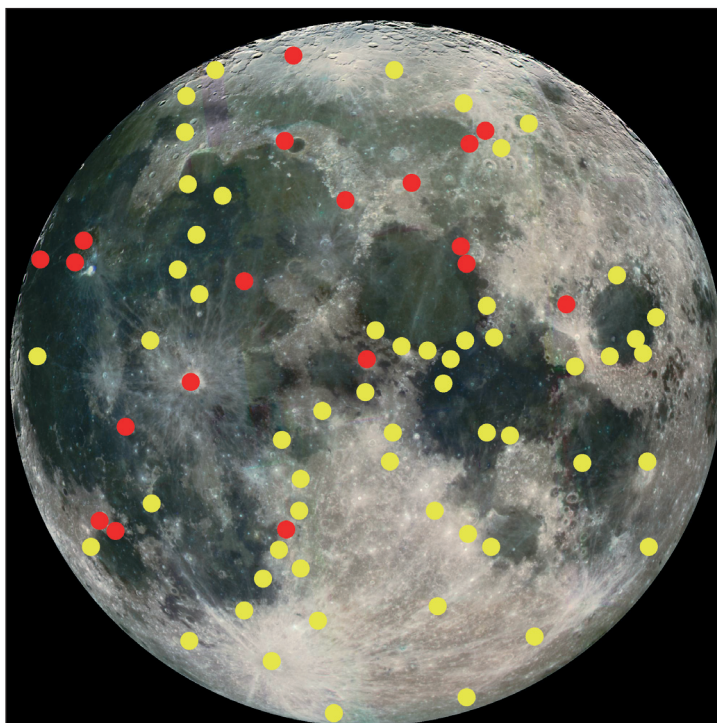
La polémica perduró hasta 1967, año en que las fotografías detalladas de la nave *Lunar Orbiter* mostraron que Linneo no es más que un cráter reciente de 2,4 kilómetros de diámetro, una profundidad de 500 metros y un extenso halo de polvo brillante a su alrededor. A la salida o puesta del Sol se aprecia como una estructura circular que emerge ligeramente sobre la superficie oscura de Mare Serenitatis. Luego, conforme la altura del Sol aumenta, cambia el brillo del material que lo rodea y experimenta una notable transformación: el polvo rocoso crece en brillo hasta ocultar al «diminuto» agujero. El hecho de que hoy sepamos que esta controversia se fundamentó sobre una ilusión óptica nos hace ser precavidos, pero eso sí, más con las interpretaciones que con los testimonios... Después de todo, algo raro sí sucede en Linneo, aunque sea un espejismo.

Muchos son los astrónomos que afirman haber observado pequeños cambios, destellos y otros fenómenos en la superficie lunar. Uno de los más acreditados profesionales de la observación del siglo XVIII, William Herschel, informó en 1787 sobre lo que él interpretó como una erupción volcánica cerca del cráter Aristarco (oficialmente llamado Aristarchus). Y no fue el único. Otros investigadores de reconocido prestigio, como Argelander, Bode, Pickering, Wilkins, Olbers, Struve y Tempel también anunciaron en su momento haber sido testigos de algún tipo de cambio en la superficie de la Luna, especialmente en las zonas próximas a los cráteres Alfonso, Platón, Aristarco, Teófilo, Gassendi, Copérnico, Humboldt y los alrededores de Mare Crisium. Rasgos, todos ellos, que hoy se encuentran al alcance de los telescopios de muchos aficionados (Figura 20.1).

¿Debemos dar un voto de confianza a los testimonios de estos observadores? La respuesta es sí. Ya en 1927 el investigador austriaco Karl Müller recopiló un total de 174 leves cambios transitorios, es decir, no permanentes, basados en fuentes históricas «de fiar». Desde entonces estos fenómenos son

---

3. Se denomina libración al balanceo periódico que experimenta un cuerpo celeste. Vista desde la Tierra, la Luna parece balancearse de lado a lado (Este-Oeste) hasta  $7^{\circ} 45'$  en cada dirección. Esto ocurre porque la velocidad de la Luna a lo largo de su órbita elíptica varía con su distancia a la Tierra, mientras que la rotación alrededor de su eje permanece constante. En la libración en latitud, el satélite parece dar cabezadas de Norte a Sur hasta en  $5^{\circ} 1'$  en cada dirección. Esto ocurre porque su eje de rotación no es completamente circular al plano de rotación. Como resultado de las libraciones, podemos ver hasta el 59% de la superficie lunar.



*Figura 20.1. Lugares de la superficie lunar que son de especial interés para el estudio de fenómenos lunares transitorios. Los puntos amarillos señalan aquellas zonas donde se ha registrado algún LTP. Los puntos rojos indican los lugares donde estos fenómenos son más frecuentes (NASA).*

denominados por las siglas LTP (del inglés *Lunar Transient Phenomena*). En la década de los sesenta la NASA encargó un informe especial sobre el tema (*Special Report 277*) a Barbara Middlehurst, de la Universidad de Arizona. Esta investigadora contabilizó más de 200 testimonios de LTP desde el siglo XIV, cifra que pronto se quedó corta, pues apenas una década después ascendían a 1.500 los fenómenos transitorios observados y recopilados por astrónomos de todo el mundo.

La mayor parte de los testimonios sobre LTP hablan de potentes destellos repentinos en zonas no iluminadas (Figura 20.2), bruscos cambios de brillo en las paredes de ciertos cráteres, oscurecimiento de rasgos por aparentes nubes de polvo, o la apreciación de manchas superficiales de tonos anaranjados y rojizos... Y no sólo a través del telescopio. Uno de los testimonios históricos más interesantes procede de una observación realizada a simple vista la tarde del 25 de junio de 1178, cuando cinco monjes británicos fueron testigos de un hecho extraordinario que ha llegado hasta nosotros a través de la crónica de Gervasio de Canterbury:



Figura 20.2. Fenómeno transitorio (flecha) registrado desde la Tierra en 1953 (Stuart, 1953).



*«Había una brillante luna nueva, y como es habitual en esta fase, sus cuernos estaban inclinados hacia el Este. De pronto el cuerno superior se abrió en dos. En el punto medio de la división emergió una antorcha flameante, que vomitaba fuego, carbones calientes y chispas.»*

Otro LTP famoso fue el observado en las proximidades del cráter Aris-tarco en el histórico momento en que el *Apolo 11* se aproximaba a su objetivo. Aunque los astronautas fueron avisados del suceso para que intentaran hacer fotografías, no hubo por su parte confirmación visual del fenómeno.

## HIPÓTESIS PARA UN MISTERIO

Pero, ¿qué son los LTP? ¿A qué tipo de proceso o procesos responden? Actualmente los especialistas barajan seis hipótesis, todas ellas igualmente probables y no excluyentes entre sí: emisiones de gas relacionadas con algún tipo de actividad volcánica residual, nubes de polvo cargado eléctricamente por efecto de la radiación solar, deslizamientos de rocas en las paredes de algunos cráteres especialmente inestables, cambios en la iluminación asociados a los complejos movimientos de libración lunar, luminiscencia de silicatos sometidos al continuo bombardeo de la radiación solar, o el resultado de la colisión de fragmentos cometarios y asteroidales.

Algunas regiones de la Luna protagonizan complejos efectos ópticos y juegos de luces que en ocasiones pueden ser confundidos con auténticos LTP. Uno de los fenómenos más conocidos son los pequeños destellos que se observan justo en el momento en que la noche cae sobre el fondo de algunos cráteres. Su origen no es otro que la repentina iluminación que experimentan algunos picos centrales (montañas formadas en los cráteres más complejos por rebote elástico del terreno tras una colisión) que sobresalen tanto con respecto al terreno circundante que sus cumbres logran atrapar unos pocos rayos solares antes de quedar completamente sumergidos en la oscuridad. Pero, de todos

los falsos LTP que cualquier aficionado puede llegar a observar y disfrutar con ayuda de un pequeño telescopio, hay uno que destaca tanto por su espectacularidad como por el misterio que lo rodea, y es que no todos los juegos de luces que se observan en la Luna cuentan con una explicación completamente satisfactoria...

El cráter Ptolomeo (Ptolomaeus en los mapas) es una estructura circular de unos 150 kilómetros de diámetro, fondo plano y bordes que se elevan casi 2.500 metros por encima del terreno circundante. Su localización no plantea demasiados problemas, pues se encuentra prácticamente en el centro de la luna: el meridiano cero lunar lo atraviesa de Norte a Sur y, en cuanto a latitud, está a menos de diez grados del ecuador lunar. Por encontrarse prácticamente en el centro del satélite, Ptolomeo recibe los primeros rayos del Sol el día del cuarto creciente, es decir, en su interior amanece precisamente ese día. Justo en el momento en que los primeros rayos solares comienzan a acariciar el fondo, aparece una franja tenue de color gris pálido que atraviesa el cráter por completo (Figura 20.3). El efecto es tan tenue que parece no ser real. Unos segundos después son varias las bandas que aparecen, pero igual que aparecen se van. Este fenómeno dura apenas unos minutos, un lapso de tiempo durante el cual el polvoriento fondo del cráter parece comportarse como un medio fluido. El fenómeno llega a su fin justo en el instante en que amanece en Ptolomeo y el fondo se ilumina con un tono similar al de los demás cráteres.

A pesar de su espectacularidad, y de estar poco documentado, este fenómeno no puede ser interpretado como un verdadero LTP, pero es, sin lugar a dudas, uno de los espectáculos más fascinantes (y raros) que con cierta periodicidad<sup>4</sup> puede observar cualquier aficionado.

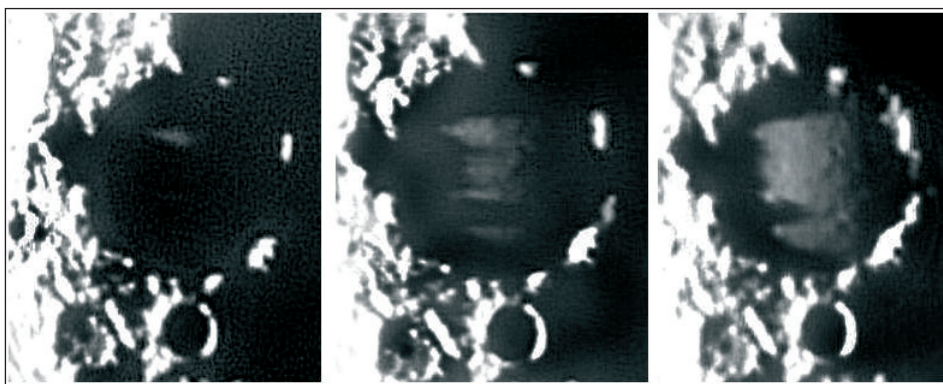
## VOLCANES EN LA LUNA

Los científicos emplean el término vulcanismo para describir *«la manifestación en la superficie de un planeta o de un satélite de los procesos térmicos internos, a través de la emisión a la superficie de productos sólidos, líquidos o gaseosos.»* Esta definición, propuesta por el geólogo británico Peter Francis en 1993, nos da una idea clara de que un volcán no es sólo una forma o un relieve, como los que observamos en la Tierra, sino que es la culminación de un conjunto de procesos muy complejos que implican la génesis, ascenso y erupción de materiales de diversa naturaleza.

La formación de los magmas, es decir, la fusión de las rocas, obedece principalmente a dos causas que pueden actuar de forma conjunta o aislada:

---

4. Este raro fenómeno sólo es visible en tres o cuatro de las lunaciones del año. Incluso las horas de observación que ofrecen los libros e efemérides suelen ser aproximadas.



*Figura 20.3. Amanecer en Ptolomeo. En la imagen central se aprecia una de las bandas grises que se forman en el interior del cráter el día del cuarto creciente. ¿Cómo se explica que en un mundo dicromático como la Luna, dominado por los fuertes contrastes del negro y el blanco, aparezca una banda gris que se desplaza como si fuera agua? ¿Por qué no sucede este mismo fenómeno en el interior de otros cráteres? (Badalotti, 1997).*

descompresión o aumento de temperatura. Así, un cuerpo inicialmente sólido puede fundirse si sobre él se aplica un considerable aumento de temperatura (también si durante millones de años acumula calor que no puede liberar), o cuando este mismo cuerpo, inicialmente sometido a grandes cargas y temperaturas, experimenta una considerable disminución de presión. Puesto que la densidad de un cuerpo disminuye cuando su volumen aumenta, el material caliente siempre tiene una densidad menor que los materiales que están a su alrededor, por lo que inmediatamente después de su formación tenderá a ascender hacia zonas más superficiales a través de fracturas. Durante su ascenso el material se enfría y puede acumularse en reservorios más superficiales, donde podrá solidificarse totalmente o continuar hacia la superficie y hacer finalmente erupción. El tipo de actividad volcánica que tiene lugar en cualquier momento o lugar depende de diferentes factores, principalmente tres: la temperatura, la composición y viscosidad del material fundido.

Uno de los rasgos morfológicos más interesantes de la Luna son sus *domos*, estructuras volcánicas de pequeño tamaño. La ausencia de formas y edificios mayores se debe a la baja viscosidad de las lavas que este cuerpo ha emitido desde su origen. Los domos se han clasificado en dos grandes grupos: el primero está constituido por estructuras circulares bajas, achatadas y perfil convexo; mientras que en el segundo se agrupan formas irregulares, casi siempre sin cráter o centro de emisión apreciable (Figura 20.4). El hecho de que la mayor parte de los LTP se hayan observado en las inmediaciones del cráter Aristarco y Vallis Schröter, zonas donde hay pequeños domos, tubos



*Figura 20.4. Domos volcánicos en la región de Gruithuisen [36°N 40°W]. La ausencia de estructuras volcánicas de mayor porte es debido a que los magmas de la Luna fueron muy poco viscosos, lo que dificultó la acumulación de los productos volcánicos en los centros de emisión. Los domos lunares se hallan concentrados en un cinturón ecuatorial (entre 30° N y 30° S), sobre todo en seis zonas: Marius Hills, Rumker Hills, Gruithuisen (en el borde de Mare Imbrium), Vitruvius, Hortensius y proximidades del cráter Cauchy (NASA/JPL).*

de lava y fracturas distensivas de tipo graben, ha favorecido el hecho de que algunos investigadores se hayan atrevido a proponer un origen volcánico del fenómeno (Figura 20.5).

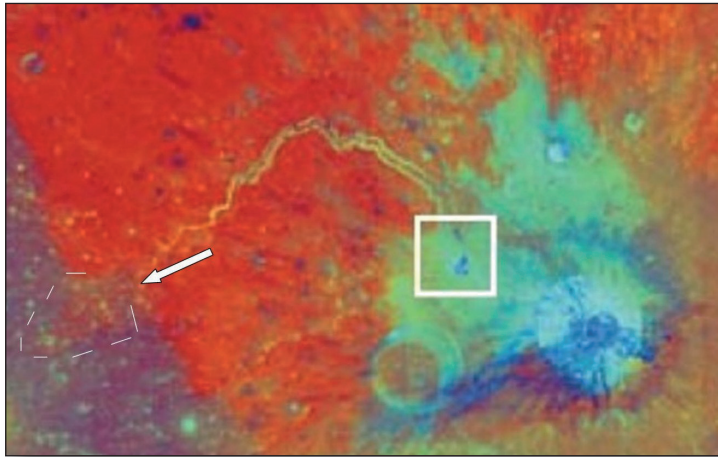
Igual que la Tierra sufre los efectos de la atracción lunar en forma de mareas, la luna experimenta un leve abultamiento de su superficie. La fría y rígida corteza se ve sometida a tensiones que poco a poco se van sumando hasta que llegan a deformarla. Los sismógrafos dejados por las misiones Apolo registraron 37 terremotos profundos en 9 años, además de los pequeños sismos que se producen cada vez que la Luna está en su perigeo (máxima aproximación a la Tierra) y la atracción gravitatoria terrestre sobre su ecuador es máxima. Como la Luna siempre nos ofrece una misma cara, los focos de los terremotos se concentran en ella. Aunque poco probable, no podemos descartar que puntualmente, y como resultado de la acumulación de estas tensiones, pueda llegar a producirse la liberación de gases en aquellos lugares próximos al ecuador donde la corteza sea más delgada y se encuentre muy fracturada



A



B



*Figura 20.5. La región de Aristarco es una de las más diversas e interesantes áreas de la Luna. En la fotografía A, realizada por los astronautas de la misión Apolo 15, se aprecian largos tubos de lava con forma de canales (rilles en la jerga selenita) cerca del cráter que da nombre a la zona (la mayor estructura de impacto que se aprecia en la imagen). En esta región se han localizado la mayoría de los LTP registrados hasta la fecha. La imagen B es un mosaico en falso color realizado por la nave Clementine. Los colores están relacionados con diferentes rocas. En azul se aprecian los materiales que forman las tierras altas (zonas más brillantes a simple vista) y que han quedado al descubierto como consecuencia del cráter excavado por Aristarco. Los basaltos de los maria aparece en amarillo-anaranjado; y los depósitos de roca emitida por procesos volcánicos posteriores (piroclásticos) en rojo. Dentro de un marco blanco se ha destacado el que parece que fue el último foco de emisión de lavas (¿la caldera?). La flecha señala el depósito que la lava dejó en forma de abanico justo al pie del edificio volcánico (NASA/JPL).*



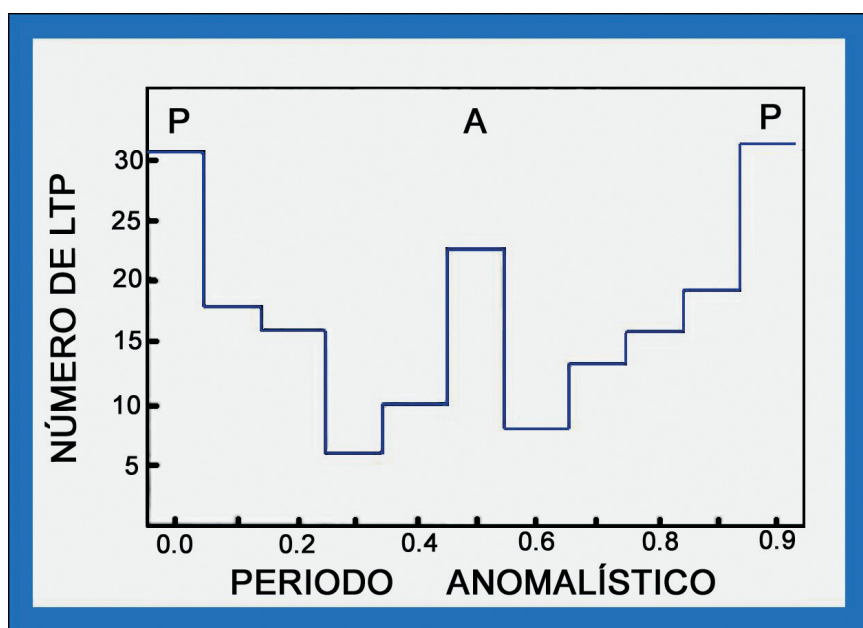


Figura 20. 6. En opinión de Barbara Middlehurst, autora del informe sobre LTP para la NASA, la mayoría de los LTP registrados coincidirían con los momentos de máximo acercamiento (perihelio -P-) entre la Tierra y la Luna, momento en que la atracción gravitatoria y la tensión mareal sufridas por la corteza del satélite es máxima. Estos esfuerzos se repiten periódicamente, exactamente cada 27,5 días, intervalo de tiempo que define el llamado mes anomalístico lunar (en Burly y Middlehurst, 1966).

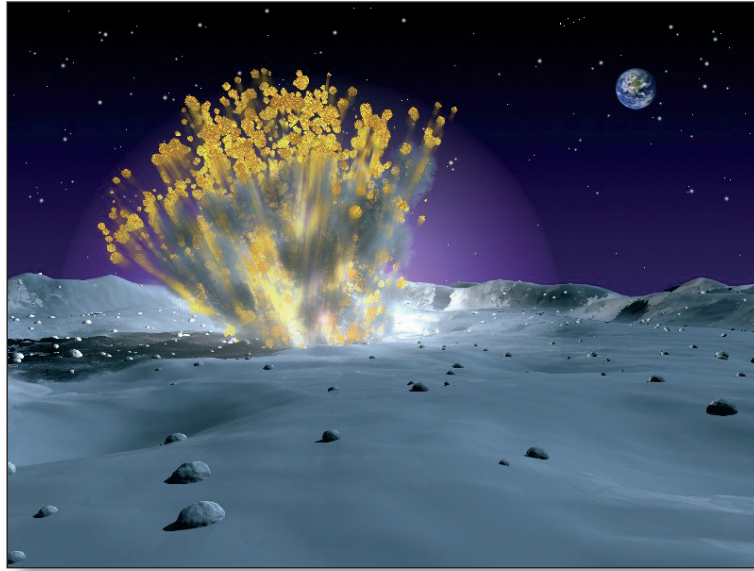
(Figura 20.6), normalmente en los bordes de las grandes cuencas de impacto y en zonas volcánicas.

## IMPACTOS REPETIDOS

Existen evidencias de que la Luna tiembla sutilmente. Su corteza es tan fría y rígida que cualquier sacudida la puede hacer vibrar como una campana o un diapasón. Además, este fenómeno puede prolongarse durante horas o incluso años (cuando el módulo *Intrepid* de la misión *Apolo 12* se posó en el océano de las Tempestades, el suelo vibró durante casi una hora). Se estima que las sacudidas que regularmente afectan al satélite responden a una media de entre 75 y 150 impactos de bólidos de gran tamaño que anualmente golpean con furia la superficie.

Durante la tormenta de meteoros de las Leónidas de los años 1999 y 2001, astrónomos aficionados y profesionales fueron testigos de al menos una docena de resplandores. Algunos incluso fueron fotografiados simultáneamente por observadores de distintas partes del planeta. Investigadores del Instituto Astrofísico de Andalucía fotografiaron los destellos colisionales de algunos

fragmentos del cometa Tempel-Tuttle capaces de formar cráteres de hasta 75 metros de diámetro, demostrando así que nuestro satélite está sometido a un continuo bombardeo de partículas que lentamente socavan su vieja superficie (Figura 20.7). Por el momento es difícil valorar cuántos de los LTP registrados hasta el momento responden a este fenómeno; pero lo que es seguro es que se trata de un riesgo potencial para cualquier base permanente que se decida instalar allí.



*Figura 20. 7. Simulación artística del impacto de un pequeño fragmento cometario contra la superficie lunar. Desde la Tierra se han podido fotografiar los destellos que producen este tipo de colisiones (NASA).*

¿Con qué frecuencia impactan contra la Luna meteoritos grandes? ¿Es un proceso esporádico o continuado? ¿Cuáles son sus efectos? No cabe duda de que los más interesados en conocer las respuestas a estas preguntas serán los exploradores que la NASA (esperemos que en colaboración con otras agencias espaciales) envíe a la Luna en el 2018. La probabilidad de que un astronauta sea herido directamente por un meteoro es minúscula; pero si el riesgo de impacto directo para un astronauta aislado es casi nulo, los eyectas generados en la colisión y los impactos secundarios sí pueden llegar a ser peligrosos para toda una base, sobre todo porque nadie sabe a qué distancia puede llegar el material expulsado por la colisión ni cómo tiene lugar este proceso. De hecho, lo más peligroso de un impacto en la Luna no son tanto los fragmentos con trayectorias balísticas, como el polvo que pueden lanzar a una amplia extensión de terreno. Los astronautas pudieron comprobar que el polvo lunar está cargado

eléctricamente y es muy «pegajoso». Incluso una pequeña cantidad puede llegar a ser una molestia: se aferra a los visores de los cascos, se introduce en las juntas y sellos tanto de los instrumentos como de los trajes, e incluso hace oler el aire cuando los astronautas regresan a los módulos de descenso.

## MOVIMIENTOS GRAVITATORIOS

Por último, aunque no por ello menos importantes, merecen nuestra atención un proceso geológico sutil pero de gran interés: los deslizamientos por efecto de la gravedad.

En la Tierra la gravedad moviliza determinados cuerpos, por lo general agua líquida o sólida, que acogen, soportan, impulsan y en definitiva, movilizan los materiales de la corteza. Sin embargo, en los cuerpos carentes de atmósfera no existe un medio fluido estable que haga de intermediario. En estos casos la gravedad impulsa directamente los materiales, propiciando fenómenos de autotraslación: la gravedad supera la inercia o resistencia al movimiento de los materiales y crea movimientos descendentes (caídas). Como cualquier otro desplazamiento, la autotraslación de materiales en una pendiente queda regulada por todas las fuerzas implicadas, en este caso peso, rozamiento y cohesión del material. En estas circunstancias el campo gravitatorio debe considerarse como el agente geológico que modela el paisaje.

Es evidente que si tienen que producirse procesos gravitacionales debe haber pendientes, como las que se observan en el interior y los bordes de los cráteres de impacto (Figura 20.8). Pero, ¿cómo pasa un cuerpo (léase roca o

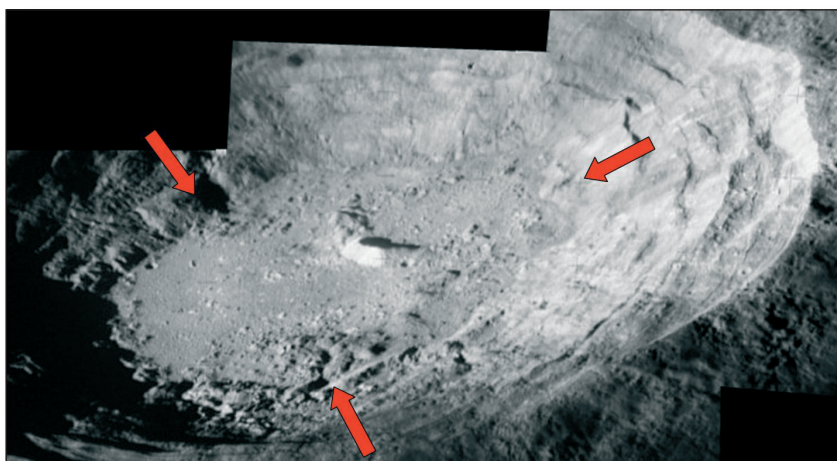


Figura 20. 8. Interior del cráter Aristarco fotografiado por la misión Apolo 15. Esta estructura, de unos 40 kilómetros de diámetro, se sitúa en 23,7° N, 47,4° O. Las flechas rojas señalan dirección y transporte de los principales deslizamientos que han tenido lugar en sus laderas (NASA/JPL).

sedimento) de estar en reposo a descender por una pendiente o caer al vacío? En un mundo con una gravedad que es un sexto de la terrestre, esta pregunta no carece de importancia.

Mucho antes de que se produzca un deslizamiento o una caída, varios procesos actúan para debilitar el material hasta hacerlo cada vez más susceptible a la fuerza de la gravedad. En la evolución de la mayoría de las formas del paisaje, los procesos gravitatorios constituyen la etapa consecutiva a la meteorización. En la jerga de los geólogos, este término hace referencia a la ruptura de las rocas y la alteración de los minerales que la constituyen, por la acción combinada de procesos físicos y químicos. En aquellos cuerpos planetarios que cuentan con una atmósfera significativa, la meteorización es la respuesta de los materiales a cambios de presión, temperatura y humedad que caracterizan el ambiente (clima) superficial. En aquellos otros que no cuentan con una atmósfera de cierta entidad, la meteorización es un proceso muy lento, o incluso inexistente. ¿Cómo se explica entonces que mundos como la Luna muestren evidencias de deslizamientos gravitacionales? (Figura 20.9). La clave está en las propiedades del suelo que podemos encontrar en ellos: el *regolito*.

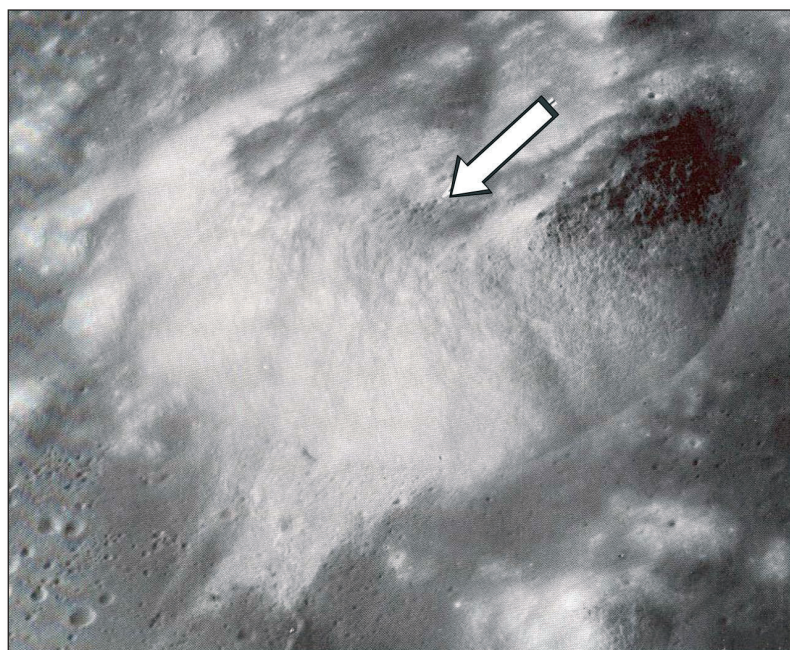


Figura 20. 9. Deslizamiento de material brillante en el borde de Taurus-Littrow, (20°N 31°E). En esta imagen se observa un deslizamiento en la base de una zona montañosa de unos 2.000 m de altura. El movimiento de masas se ha producido en la dirección y sentido que señala la flecha. Las montañas de Taurus-Littrow, el borde de Mare Serenitatis, fue el lugar de alunizaje del Apolo 14 (NASA/JPL).



El regolito es una capa continua de material fragmentario, producido por impactos asteroidales y cometarios, que cubre las superficies de algunos planetas, satélites y asteroides. El ejemplo mejor estudiado es el regolito lunar, de varios metros de espesor y con componentes que varían desde bloques de tamaño métrico hasta material fino como el talco. Es un material suelto que incluye fragmentos de roca y granos minerales. Estas partículas no consolidadas pueden mantenerse estables en las laderas de una pendiente dependiendo del tamaño y forma que presentan: los granos mayores y más angulosos sostienen a los más pequeños y redondeados. Además, los granos de polvo se mantienen cohesionados entre sí debido a la existencia de fuerzas electrostáticas de atracción mutua. En la Tierra la arena húmeda ayuda a incrementar la cohesión: el agua es una molécula dipolar, es decir, está polarizada eléctricamente. En la Luna, un mundo sin atmósfera, prácticamente deshidratado (a excepción quizá de ciertas zonas polares) y carente de un campo magnético, es el continuo bombardeo de partículas cargadas eléctricamente procedentes del Sol el que desempeña el papel de agente cohesivo.

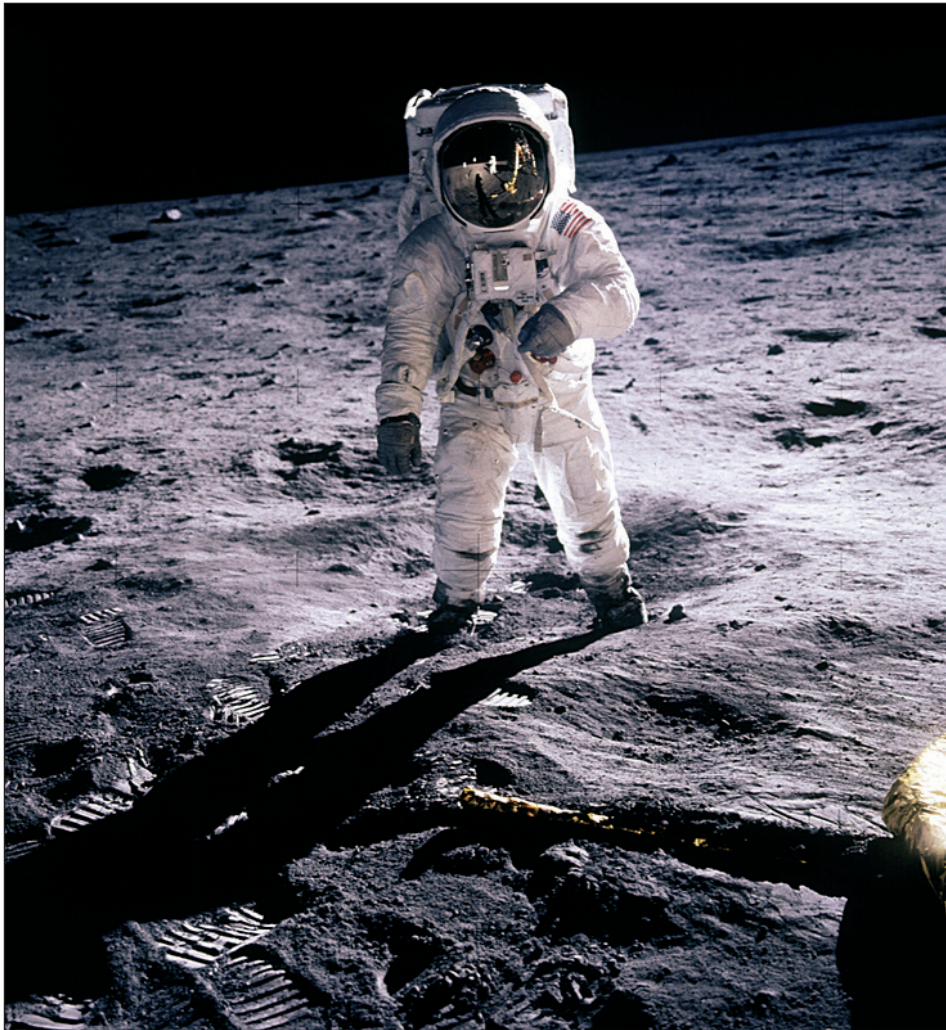
Cuando una pendiente se desestabiliza, bien porque tiembla como consecuencia de pequeños terremotos o impactos, bien porque el material se rompe como consecuencia del desgaste que sobre él ejercen los ciclos de dilatación-contracción que experimenta cuando es sometido a bruscos cambios de temperatura (en pocos metros la superficie lunar pasa de los 117 grados en la parte iluminada a los 173 bajo cero registrados en las zonas de penumbra), entonces los materiales se ajustan a las nuevas condiciones desplazándose pendiente abajo, restaurando su estabilidad. Estos deslizamientos deben levantar ingentes cantidades del mismo molesto polvo del que se quejaban los astronautas.

## **LAS HUELLAS DEL GÉNESIS**

Las generalizaciones siempre son peligrosas pero, después de medio siglo de exploración planetaria, podemos aventurar que los impactos, el vulcanismo y los movimientos gravitatorios son quizá los procesos geológicos más universales. Los tres han actuado sobre la corteza de la Luna, y los LTP pueden ser la prueba de que quizá aún lo hagan en lugares muy concretos de su geografía. Pero a falta de unos procesos geológicos eficaces, el principal agente modelador no es otro que la permanente lluvia de micrometeoritos que cae sobre la superficie selenita. Los investigadores calculan que estos pequeños impactos pueden remover el primer centímetro de suelo lunar cada 10 millones de años. Si esto es así, probablemente las huellas de los astronautas que caminaron por la superficie lunar permanecerán más tiempo



que cualquier construcción humana (Figura 20.10). Estas leves cicatrices en el regolito podrían ser nuestro principal legado como especie... la prueba de que estuvimos en este rincón del Universo. Quién sabe, quizá algún día, en un futuro remoto, un explorador (quizá alienígena) descubra por casualidad las huellas del Génesis.



*Figura 20. 10. Esta imagen, icono de la ciencia y la tecnología del siglo XX, sirvió de portada para del número de diciembre de 1969 de la revista Nacional Geographic. Las huellas que los astronautas dejaron en la Luna permanecerán intactas durante millones de años (NASA/JPL).*



## 21. UN COMETA DIFERENTE

A mediados del pasado siglo XX comenzó a gestarse la idea de que el Sistema Solar no podía terminar bruscamente en la órbita de Plutón. Hoy sabemos que más allá se extiende una vasta región de espacio poblada por millones de núcleos cometarios inertes y mundos de hielo de considerable tamaño. Durante más de medio siglo se ha popularizado la idea de que estos escombros no son más que grandes bolas de nieve y polvo cohesionadas por acción de la gravedad; sin embargo, los recientes datos obtenidos por las sondas *Stardust* y *Tempel 1* comienzan a poner en duda este sencillo modelo.



Figura 21.1. En 1986 una flotilla de sondas espaciales se aproximó al cometa Halley con el objetivo de estudiar su estructura y composición. Esta imagen es un mosaico de 60 fotografías realizado por la nave europea Giotto. En ella se aprecia que el núcleo del Halley es irregular y alargado, mostrando un eje mayor de aproximadamente 15 kilómetros de longitud. De su superficie brotan chorros de vapor de agua y finas partículas de polvo que posteriormente serán moldeadas por la presión de la luz y el viento solar hasta formar la cola del cometa. Las fotografías fueron realizadas desde una distancia de 600 kilómetros. (ESA)

En las enciclopedias y libros de texto se afirma que un cometa no es más que una amalgama de hielo de agua, metano, amoníaco y monóxido de carbono aliñado con un poco de polvo y rocalla. Este sencillo modelo, más conocido con el sobrenombre de *bola de nieve sucia*, fue postulado en 1949 por el astrónomo norteamericano Fred Lawrence Whipple y confirmado en 1985 durante la última visita del cometa Halley al interior del Sistema Solar. Fue entonces cuando en el marco de la misión *Giotto* se detectó sin ambigüedades la existencia de moléculas de agua en un cometa. Las difusas imágenes del núcleo del Halley confirmaron que su superficie es suave y sin relieves, tal y como cabría esperar en una inmensa bola de nieve sometida a un intenso e irreversible proceso de sublimación (Figura 21.1).

En 1993 el ya popular modelo de Whipple volvió a verse reforzado cuando el campo gravitatorio de Júpiter logró atraer y fragmentar el cometa Shoemaker-Levy 9, confirmando que se trataba de una pila de escombros unidos entre sí por la acción de la gravedad y las bajas temperaturas (Figura 21.2). El modelo de Whipple fue puesto a prueba una vez más en septiembre de 2001, cuando la sonda *Deep Space 1* pasó a 2.200 kilómetros del núcleo del cometa Borrelly. En esta ocasión se obtuvieron imágenes de mejor resolución que las de la nave *Giotto* quince años antes, y no fue una sorpresa para nadie descubrir un paisaje que recordaba bastante a lo ya visto en el Halley (Figura 21.3). El modelo de bola de nieve sucia parecía no tener fisuras después de medio siglo de hegemonía y tres espectaculares confirmaciones.

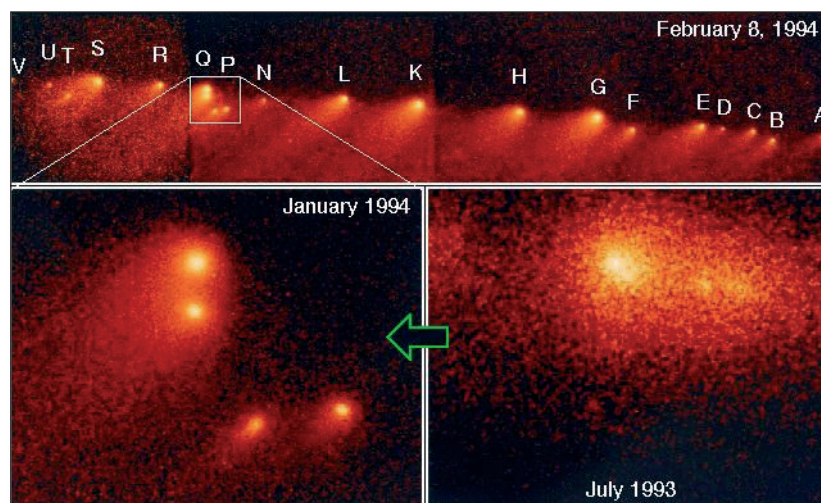
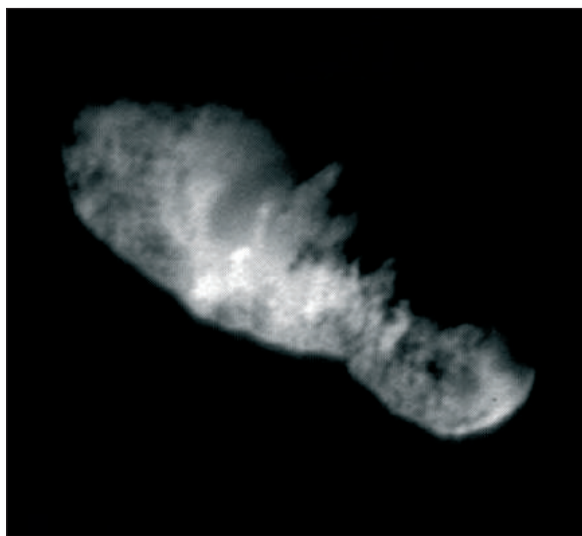


Figura 21.2. Tres instantáneas del cometa Shoemaker-Levy 9 antes de impactar contra Júpiter. En la secuencia de imágenes se aprecia cómo el núcleo se va disgregando en múltiples fragmentos (cada uno denominado con una letra de la A hasta la V) conforme se acerca a Júpiter. (Space Telescope Science Institute).

*Figura 21.3. El núcleo del cometa Borrelly fue fotografiado por la sonda norteamericana Deep Space 1 en septiembre de 2001. Esta imagen, captada a una distancia de 2.200 kilómetros, nos muestra un cuerpo bastante irregular (el eje mayor mide unos 8 kilómetros) con una superficie suave y sin cráteres visibles, un paisaje semejante al que muestra el cometa Halley en la figura 21.1 (NASA)*

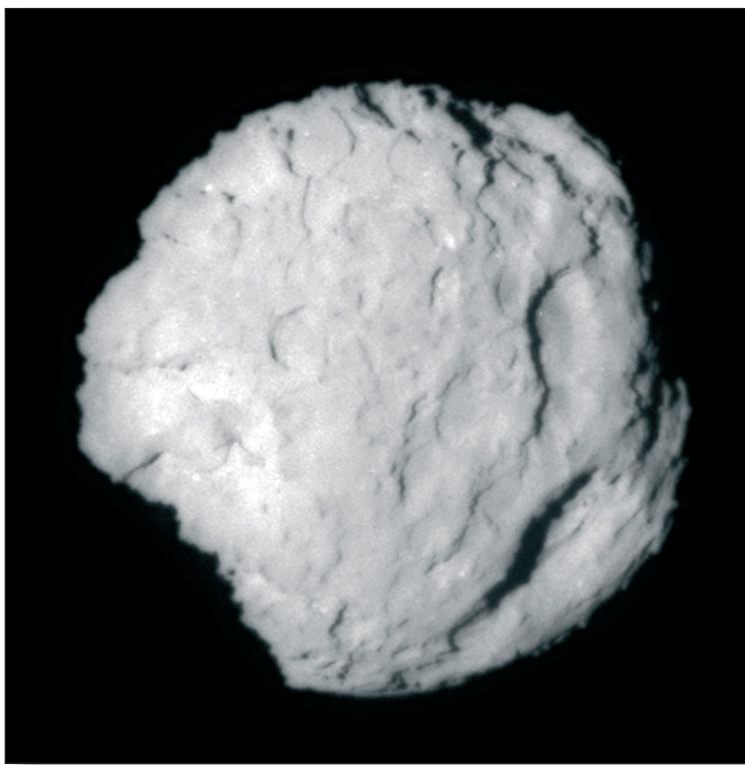


## UN VIAJE ALUCINANTE

Los cometas activos son unos recién llegados al interior del sistema. Uno de los fichajes más recientes es el Wild 2, un núcleo cometario de aproximadamente 5 kilómetros de diámetro que en 1974 fue atrapado por la gravedad de Júpiter. Se estima que desde entonces tan sólo se ha acercado en cinco ocasiones al Sol, un hecho que lo convierte en un objeto de singular valor científico, pues es muy posible que aún se conserve prácticamente inalterado desde su formación en la nebulosa solar hace 4.500 millones de años. El 2 de enero de 2004 la sonda *Stardust* (literalmente polvo de estrellas) pasó a tan sólo 236 kilómetros de distancia de él, y durante su encuentro, el más próximo realizado a un cuerpo de esta naturaleza hasta la fecha, la nave se zambulló de lleno en su estela de polvo para cumplir con el principal objetivo de la misión: recoger con la ayuda de un panel de aerogel muestras de los granos de polvo (preciado tesoro científico) que escapan por sublimación desde el núcleo. Para mantener la orientación adecuada durante el tiempo que duraba esta delicada operación, los técnicos emplearon la cámara de navegación de la sonda; y así, mientras el ingenio automático seguía la estela del cometa a una velocidad de casi 21.000 kilómetros por hora, ésta les permitía confirmar el rumbo a la vez que captaba espectaculares instantáneas de su superficie (Figura 21.4).

El 18 de junio de 2004 la revista norteamericana *Science* publicó los resultados del detallado análisis al que habían sido sometidas las 72 imágenes captadas por la cámara de navegación de la sonda *Stardust*. Según el astrónomo de la Universidad de Washington en Seattle, Donald E. Brownlee, principal responsable científico de la misión, las fotografías revelaban claramente que la





*Figura 21.4 Núcleo del cometa Wild 2 fotografiado por la sonda Stardust en enero de 2004. Wild 2 tiene aproximadamente 5 km de diámetro y una superficie muy accidentada. En la imagen se aprecian diversos rasgos que por su forma recuerdan a cráteres de impacto; sin embargo, la ausencia de bordes levantados en la mayoría de estas depresiones permite sospechar que muchas se hayan formado por sublimación de la corteza de hielo al acercarse al Sol. (NASA)*

estructura del núcleo era mucho más compleja de lo que cabría esperar en una simple bola de hielo sucia. En ellas se pueden apreciar rocas de gran tamaño, riscos de más de cien metros de altura, fracturas y algunos elementos circulares que parecen cráteres de impacto de hasta 1,6 kilómetros de diámetro. Algunos de estos cráteres se interpretan como la parte más antigua del cometa, quizá un relicto de los impactos recibidos en los albores del Sistema Solar. Otros, sin embargo, recuerdan a socavones, quizá causados por la sublimación del hielo al ser calentado por el Sol. Todos estos rasgos geológicos observados en el núcleo son claros indicios que en el interior de este cometa hay algo más que agua y polvo congelados. Los altos riscos, las fracturas y el tamaño de los cráteres evidencian que la corteza del cometa es razonablemente sólida y ha soportado bien las tensiones a que se ha visto sometida a lo largo de su tortuosa historia. En opinión de Brownlee, «el Wild 2 es probablemente una

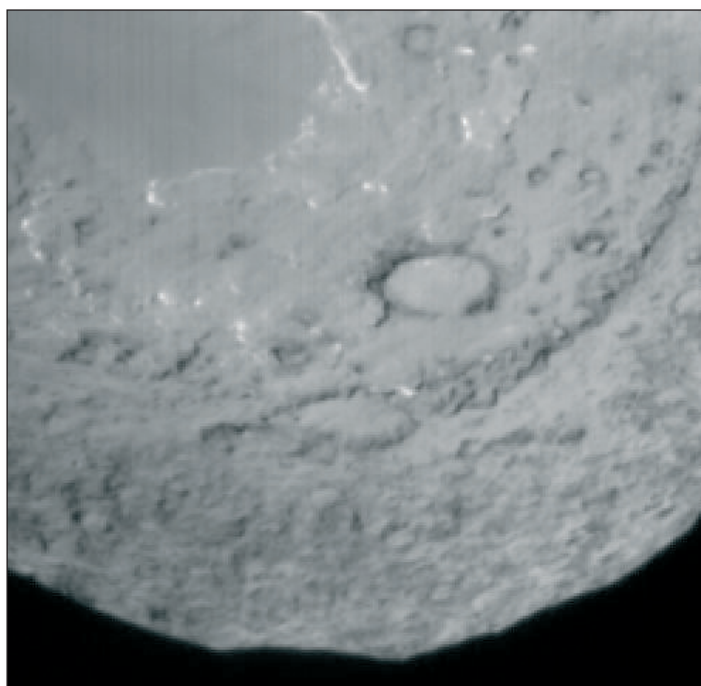
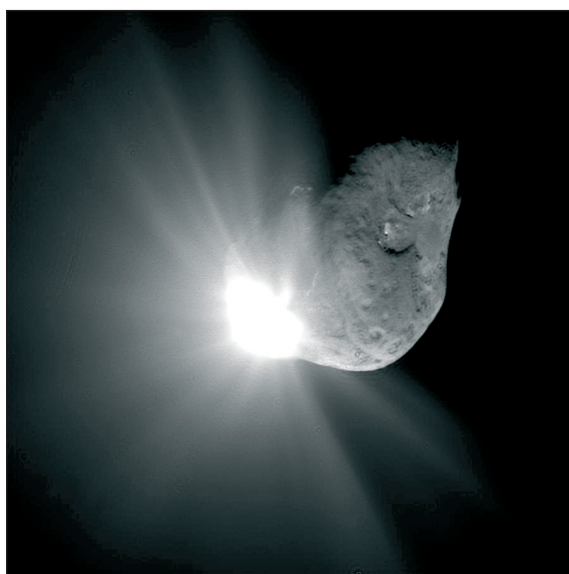
*mezcla de material rocoso de grano fino que se mantiene unido por agua congelada, monóxido de carbono y metanol».*

¿Hasta qué punto podemos afirmar que Wild 2 es un cometa fuera de lo común? ¿Encajan estos resultados en el popular modelo de Whipple? Si nos atenemos a las imágenes de los cometas Halley y Borrelly (fotografías de menor calidad y resolución), no tenemos la total certeza de que su aspecto sea radicalmente distinto al de ellos; sin olvidar que la muestra de núcleos cometarios fotografiados a día de hoy es a todas luces poco representativa, apenas media docena. Ahora bien, si partimos de la base de que en las regiones externas del sistema pueden existir hasta un billón de núcleos cometarios inertes (una cantidad nada despreciable), bastaría con que Wild 2 representara tan sólo al 1% de la población cometaria para que pudiéramos afirmar con rotundidad que este tipo de cuerpos es muy abundante... O quién sabe, quizá realmente nos hayamos topado con un cometa único en su especie.

### **TEMPEL 1: DIRECTOS AL NÚCLEO**

El 4 de julio de 2005 la NASA celebró la fiesta nacional de Estados Unidos apuntándose una proeza tecnológica (una más) en su cuenta personal. Tras un viaje de 172 días y 430 millones de kilómetros la nave *Deep Impact* lanzó un proyectil del tamaño de una lavadora contra el cometa Tempel 1, culminando de esta forma una histórica misión: por primera vez un artefacto iba a colisionar contra un cometa. La incertidumbre sobre la densidad real del objetivo era tal que los científicos de la misión no descartaban la posibilidad de que el proyectil pudiera atravesar limpiamente la superficie del Tempel 1 sin producir la colisión esperada. Pero finalmente no se produjeron sorpresas. El «impactor», como fue bautizado el proyectil, se estrelló contra el núcleo del Tempel 1 a una velocidad de 37.000 kilómetros por hora, creando un resplandor de unos 60 kilómetros y un cráter de 250 metros de diámetro, un tamaño respetable para un cuerpo que apenas mide 6,5 kilómetros (Figura 21.5). Tanto el proyectil como su nave nodriza recabaron todo tipo de datos y tomaron cientos de fotografías de la superficie del cometa hasta unos pocos segundos antes de que se produjera la colisión.

Pero, ¿por qué recurrir a un impacto para estudiar un cometa? Un impacto de estas características puede lanzar al espacio una buena cantidad de material interno del núcleo, escombros que pueden ser analizados por varios métodos: la luz que refleja da muchas pistas sobre su composición química, su grado de opacidad, la velocidad con que resulta lanzado y, sobre todo, la forma con que vuelve a caer sobre la superficie por efecto de su gravedad, permite estimar el tamaño de las partículas que lo forman y su masa. Según estos datos el núcleo del Tempel 1 lo constituyen partículas muy finas, con diámetros de entre 1



*Figura 21.5 Dos instantáneas del cometa Tempel 1. En la imagen superior se observa el destello que se produjo por el impacto del proyectil lanzado por Deep Impact. En la imagen inferior se aprecian algunos rasgos del núcleo, en su mayoría cráteres de impacto. (NASA/JPL/U. de Maryland).*

y 100 micras (milésimas de milímetro). Además, éstas no pueden estar muy compactadas, pues el cometa tiene una densidad sorprendentemente baja, tan sólo 0,6 gramos por centímetro cúbico (recordamos que el agua pura tiene una densidad de 1 gramo por centímetro cúbico). Al contrario que el Wild 2, el núcleo no se parece a una roca, sino a una pelota de polvo que se mantiene unida por su propia atracción gravitatoria.

Los datos más sorprendentes proceden de la comparación de los espectros luminosos antes y después del impacto. Antes del impacto, el material lanzado naturalmente por sublimación consistía sobre todo en agua y  $\text{CO}_2$ , con pequeñas cantidades de sustancias orgánicas (compuestos del carbono similares a los constituyentes básicos de la vida). Tras el impacto se aprecia un incremento de los compuestos orgánicos, que llegan a ser tan abundantes como el agua. ¿Cuál puede ser la causa de esta sorprendente variación? ¿Quizá el impacto pusiera al descubierto compuestos orgánicos complejos almacenados en el subsuelo? ¿Qué hay bajo la superficie de Tempel 1?

Sea lo que sea lo que esconde, debe encontrarse bien conservado. La luz infrarroja emitida por el cometa ha permitido calcular con bastante precisión la temperatura de la superficie de su núcleo en los días previos y posteriores al impacto, cuando el cometa estaba a 134 millones de kilómetros de la Tierra. Las zonas iluminadas por el Sol estaban a 56 grados centígrados, y las que quedaban a la sombra de algún accidente topográfico no superaban los 13 bajo cero. El núcleo rota sobre su eje cada 41 horas, y por tanto las zonas de luz y de sombra varían continuamente. El hecho de que pese a ello la temperatura se pueda correlacionar tan bien con la luz y la sombra, indica que el Sol sólo puede calentar la capa más superficial del cometa. De lo contrario, el calor acumulado en las capas más profundas impediría que las zonas sombreadas se enfriaran tan rápido. En otras palabras: el interior del cometa está bien protegido de los ciclos frío-calor que experimenta periódicamente la superficie. El calor no se conduce fácilmente al interior, y el hielo y los demás materiales situados a cierta profundidad pueden permanecer prístinos desde el origen del Sistema Solar, cuando se formó el cometa.

La misión Stardust aún no ha finalizado. Está previsto que en enero de 2006 lleguen a la Tierra más de mil gránulos de material inalterado desde hace más de 4.000 millones de años. Estas preciadas muestras nos ayudarán a conocer mejor la naturaleza del cometa Wild 2, quizá de todos los cometas, y recrear con cierto detalle los primeros instantes del Sistema Solar. Mientras esto sucede, dado el excelente estado de salud del instrumental, la NASA se plantea extender la misión *Deep Impact* hacia otro cometa.

No lo duden, la revolución de la exploración cometaria está en marcha, y estos son sólo los primeros pasos de un viaje fascinante hacia nuestros orígenes.





## 22. ETÉRNAMENTE JÓVENES

Ío es el mundo volcánico más activo del Sistema Solar. Cientos de calderas, lagos y ríos de roca fundida modifican y rejuvenecen continuamente su corteza. La vecina Europa es el satélite más liso y brillante del sistema joviano. Su prístina corteza de agua helada, también una de las más jóvenes que conocemos, descansa sobre un profundo océano de agua salada de unos 100 kilómetros de profundidad. Ío y Europa, dos mundos con motores a pleno rendimiento por imperativo de la mecánica celeste.

A mediados del pasado siglo XX la comunidad científica internacional comenzó la ardua tarea de analizar, de forma exhaustiva y sistemática, la luz solar que llega hasta nosotros después de ser reflejada por los mundos que pueblan el Sistema Solar exterior. El espectro de luz correspondiente a Ío, el satélite galileano más próximo a Júpiter, reveló una total ausencia de agua en superficie, un hecho que desconcertó a toda una generación de geoquímicos formados bajo la ortodoxia que suponía que más allá de la órbita de Marte sólo podían existir mundos de agua helada. Pocos años después, a comienzos de la década de los 70, se descubrió que Ío experimentaba episódicas variaciones de brillo que coincidían con incrementos en la radiación térmica registrada mediante radiotelescopio. Ahora eran los astrónomos quienes estaban perplejos. Y por si aún quedaba alguna duda de que algo raro acontecía en la superficie de aquel satélite, a mediados de esa misma década se detectaron en sus inmediaciones extensas nubes de iones y azufre en interacción con la magnetosfera de Júpiter, formando a su alrededor una estructura toroidal semejante a un *dónut*. ¿De dónde procedía este material si la ortodoxia emanada del Proyecto Apolo demostraba que un satélite del tamaño de la Luna no podía permanecer geológicamente activo hasta nuestros días?

En marzo de 1979 apareció en la revista *Science* un artículo decisivo en la historia de las ciencias planetarias. Bajo el conciso título de *Melting of Io by Tidal Dissipation* (Fusión de Ío por Disipación Mareal), los investigadores Stanton J. Peale, Ray T. Reynolds y Patrick M. Cassen proponían en él una

idea completamente revolucionaria: las fuerzas de marea pueden ser una importante fuente de calor, capaces incluso de mantener a pleno rendimiento la maquinaria geológica de un cuerpo planetario. Los períodos orbitales de las lunas más próximas a Júpiter, Ío y sus vecinas Europa y Ganímedes, están atrapados por una de las resonancias orbitales estudiadas en el siglo XIX por el astrónomo francés Pierre Simón de Laplace. Con la precisión de un reloj suizo, cada vez que Ganímedes completa una vuelta alrededor de Júpiter (lo que sucede cada 7,2 días), Europa completa dos e Ío exactamente cuatro (Figura 22.1). De esta resonancia se deduce que los satélites están imponiendo, por atracción gravitatoria, cierta excentricidad a la circularidad de sus órbitas. De esta forma las trayectorias oscilan, se alejan y acercan de Júpiter periódicamente, produciendo así una marea o abultamiento más intenso que va calentando el cuerpo por rozamiento interno, una fricción periódica que mantiene permanentemente fundido el interior de Ío desde hace cientos, quizá miles, de millones de años.

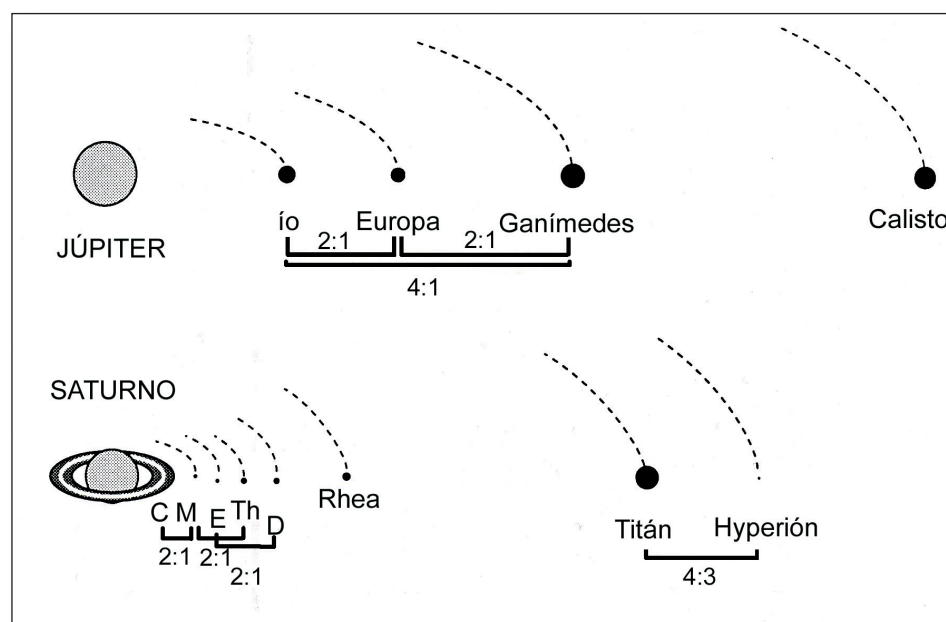
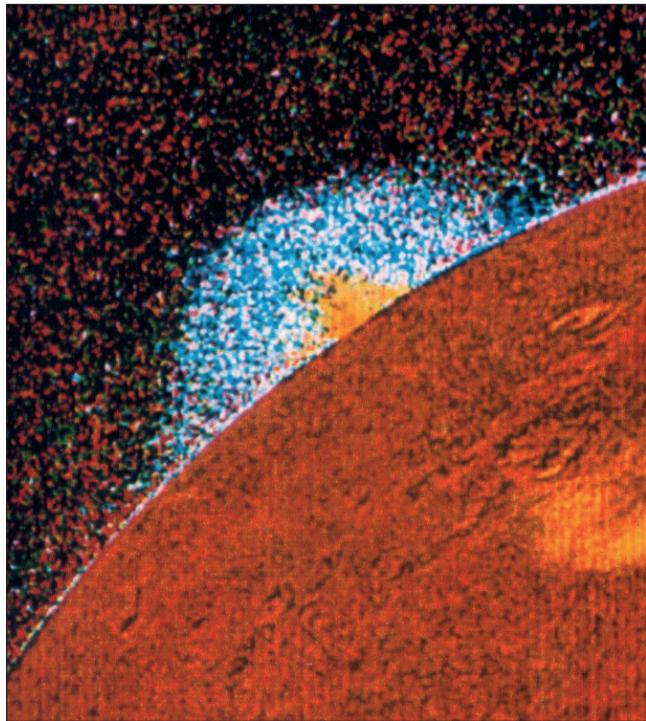


Figura 22.1. Tres de los cuatro satélites galileanos cuentan con períodos orbitales conmensurables, es decir, mantienen entre sí una relación de números enteros. La relación orbital de Ganímedes con respecto a Ío es 1:4, la de Europa respecto a Ío es 1:2, y la de Ganímedes con respecto a Europa es 1:2. Lo mismo sucede en el sistema de Saturno, donde mantienen resonancias un total de seis satélites: Miranda (M) con el anillo C de Saturno y con Thetys (Th), Encélado (E) con Dione (D) y Titán con Hyperión.

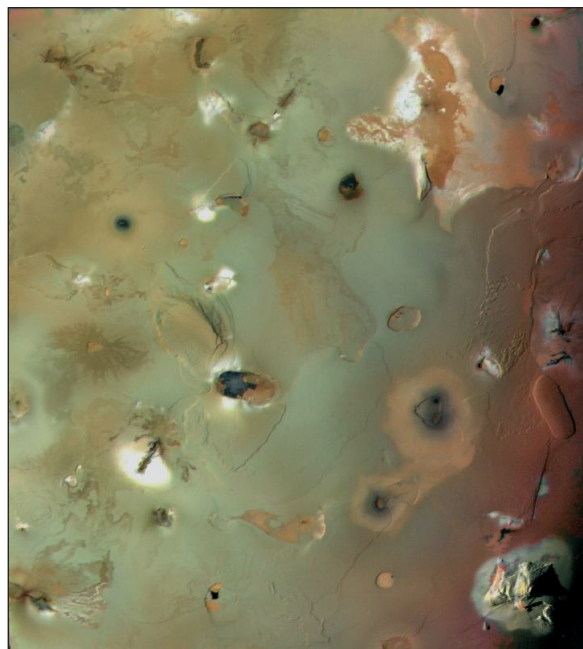
El modelo de Peale y sus colegas vio la luz apenas unos días antes de que la nave *Voyager 1* se acercara a Ío. En las primeras imágenes del satélite no se apreciaron huellas de cuencas de impacto como las que podemos observar en la Luna, un hecho que dejó un tanto sorprendidos a los científicos de la misión. En su lugar se divisaban manchas rojizas y amarillentas que parecían salpicar la superficie. La confirmación definitiva de que se trata de un mundo volcánicamente activo se produjo el viernes 9 de marzo de 1979, cuando Linda Morabito, una de los técnicos de la misión, descubrió por casualidad un extraño punto brillante justo en el limbo del satélite. Lo que en principio confundió con la estrella AGK3-10021, un punto de referencia para la navegación estelar de la sonda, resultó ser en realidad la erupción de un volcán que expulsaba material a 270 kilómetros de altura. Por casualidad -pura serendipia- había descubierto el primer volcán activo fuera de la Tierra, Loki Patera (Figura 22.2). El descubrimiento confirmaba espectacularmente la hipótesis de la fusión por calor mareal, y demostraba que la Tierra no es el único cuerpo volcánicamente activo del Sistema Solar. Aún quedaban por explorar las lunas de otros tres planetas gigantes, y la disipación de energía por fricción mareal ofrecía a los exploradores de mundos un nuevo horizonte: planetas y satélites con una dinámica geológica susceptible de ser comparada con la de nuestro planeta.



*Figura 22.2. Vulcanismo extraterrestre. Esta imagen del volcán Loki Patera fue tomada por la sonda Voyager 1 en 1979 y demostró la existencia de vulcanismo activo fuera de la Tierra (NASA/JPL).*

## UN INFIERNO VISTO DE CERCA

Sólo con las imágenes obtenidas por las naves *Voyager* se localizaron más de 200 calderas volcánicas mayores de 20 kilómetros de diámetro, una cifra espectacular si tenemos en cuenta que en la Tierra sólo hay 15 volcanes que presenten estas dimensiones. En cuanto a la composición, mientras que la mayoría de las erupciones volcánicas que tienen lugar en nuestro planeta son silicatadas, es decir, en los magmas encontramos sílice, aluminio, hierro y magnesio que forman parte de las rocas volcánicas más comunes (basaltos y andesitas), existen muchas razones para suponer que el vulcanismo en Ío está basado en el azufre. Los sulfuros son muy abundantes en el Sistema Solar y los análisis espectrales revelaron una gran cantidad de dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ), tanto en su superficie como en la nube de plasma que lo envuelve e interacciona con la magnetosfera joviana. Según los datos registrados por las *Voyager*, la temperatura máxima de los magmas que emiten los grandes edificios volcánicos del satélite no supera los 600 grados, una temperatura sólo compatible con vulcanismo de azufre, pues las coladas basálticas típicas del vulcanismo silicatado terrestre necesitan temperaturas superiores a los 1.000 grados para mantenerse fundidas. Además, las coloraciones amarillas y marrones de las imágenes sugerían una clara relación con el azufre y las diferentes formas cristalógicas que éste puede adoptar (formas alotrópicas) en función de la temperatura. Según esta idea, los materiales de color marrón se encontrarían más calientes que los amarillos o blancos, identificando éstos últimos con escarcha de  $\text{SO}_2$  (Figura 22.3).



*Figura 22.3. La carencia de cráteres de impacto significa que la superficie de Ío es la más joven del Sistema Solar. Todo el satélite está cubierto por los materiales arrojados por docenas de volcanes activos: se han contabilizado unos 300 centros volcánicos, la mayoría situados en la zona ecuatorial. En la imagen, los puntos oscuros son los centros de emisión, y las líneas oscuras, coladas de lava (JPL/NASA).*

Aunque todas las piezas parecían encajar a la perfección, ya en la década de los 80 algunos investigadores se atrevieron a poner en duda el modelo de vulcanismo basado en el azufre. El principal argumento de los detractores fue el tamaño de los edificios volcánicos recién descubiertos, algunos con escarpadas paredes verticales de casi 10 kilómetros de altura. La estabilidad de relieves tan acusados implica necesariamente que la litosfera elástica del satélite debe ser lo suficientemente fuerte y robusta como para soportar su peso e impedir que se derrumben, algo totalmente incompatible con los modelos basados en la estabilidad del azufre. A falta de más y mejores datos, la balanza de la controversia estaba condenada a mantenerse equilibrada durante los siguientes veinte años.

## LA MIRADA DE GALILEO

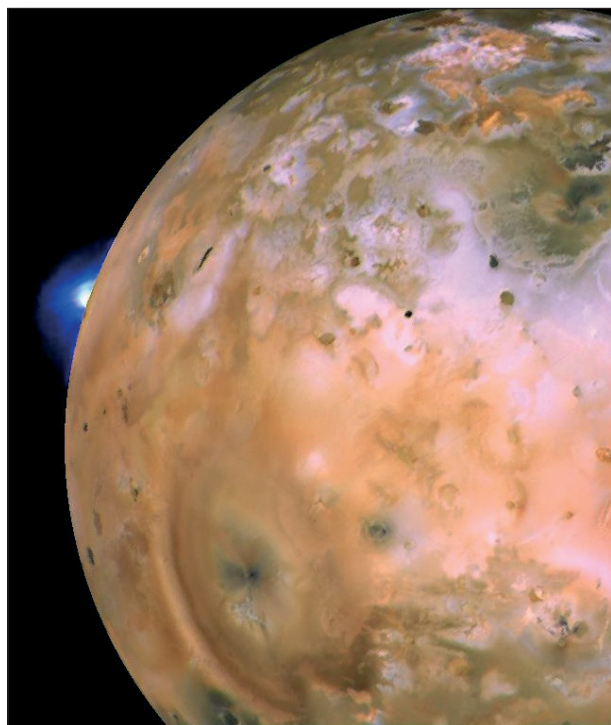
Tras la llamada *Era Voyager* no fue una tarea sencilla volver a rebasar la órbita de Marte. Innumerables reajustes de presupuesto y problemas con los trasbordadores espaciales (entre ellos la pérdida del *Challenger*), retrasaron la salida de la siguiente nave con destino a Júpiter durante una década. Finalmente, en diciembre de 1995, y tras seis años de azaroso viaje, la nave Galileo alcanzó el sistema joviano; sin embargo, aquella misión estaba diseñada para dedicar menos tiempo a la observación de Ío que al resto de lunas. La razón era de peso: esta luna se encuentra inmersa en los potentes cinturones de radicación de Júpiter, por lo que cualquier acercamiento próximo podía dañar irremediablemente los circuitos electrónicos de la nave. La primera aproximación tuvo lugar en 1995 y fue de carácter puramente técnico. En aquella ocasión la *Galileo* sobrevoló Ío a sólo 900 kilómetros de distancia con el fin de estabilizar su trayectoria. No regresaría hasta finales de 1999 cuando, una vez completada la mayor parte de la misión, se pudieran correr mayores riesgos. La espera merecía la pena.

Las peligrosas zambullidas en los cinturones de radiación permitieron a la nave fotografiar el brillo de los volcanes en diferentes longitudes de onda y registrar con precisión su temperatura, una medida clave para determinar su composición y resolver la controversia del azufre. Los sensores de la *Galileo* descubrieron lavas que eran emitidas por encima de los 1.800 grados, además de numerosos cambios de color no asociados a variaciones de temperatura, poniendo en serios aprietos el modelo de las formas alotrópicas del azufre. Puesto que la temperatura de fusión de una roca depende de su composición, estos valores indican que las lavas más calientes deben tener un alto contenido en magnesio (las rocas que en la Tierra muestran esta composición reciben el nombre de ultramáficas). Así pues, y aunque desconocemos la proporción en que se encuentran, la corteza de Ío debe contar con una significativa cantidad de silicatos. Estas mediciones resolvieron un enigma pero, como no podía ser



de otra manera, crearon otro: la Tierra no ha producido magmas a tan alta temperatura desde hace 2.500 millones de años. Incluso es posible que sean los magmas silicatados más calientes que hayan existido nunca. Esto nos lleva a plantearnos nuevas e interesantes preguntas: ¿cómo se comportan las lavas emitidas a esa temperatura? ¿Cuál es su composición? ¿Existirá un océano de roca fundida en el interior del satélite? (Figura 22.4).

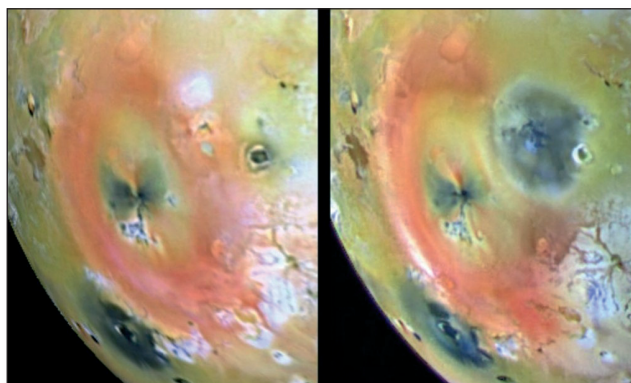
Se estima que la superficie de Ío se regenera globalmente entre 1 y 10 milímetros anualmente, o lo que es igual, los volcanes del satélite emiten del orden de  $500 \text{ km}^3$  de lava al año; un valor 100 veces superior a la tasa de magma emitido anualmente por la Tierra (Figuras 22.5 y 22.6). Sin duda los procesos volcánicos más espectaculares son las llamadas plumas volcánicas, responsables de las variaciones de brillo y las anomalías en la radiación térmica descubiertas en la década de los 70. A comienzos de los 80 se interpretaron como erupciones volcánicas muy explosivas, pero hoy se las considera manifestaciones de tipo géiser a escala planetaria; incluso han podido ser fotografiadas por el Telescopio Espacial Hubble (Figuras 22.7). Los modelos indican que estas fuentes son capaces de emitir un tenue vapor de  $\text{SO}_2$  a una velocidad de 1.000 metros por segundo hasta alcanzar 300 kilómetros de altitud. Las partículas inyectadas al



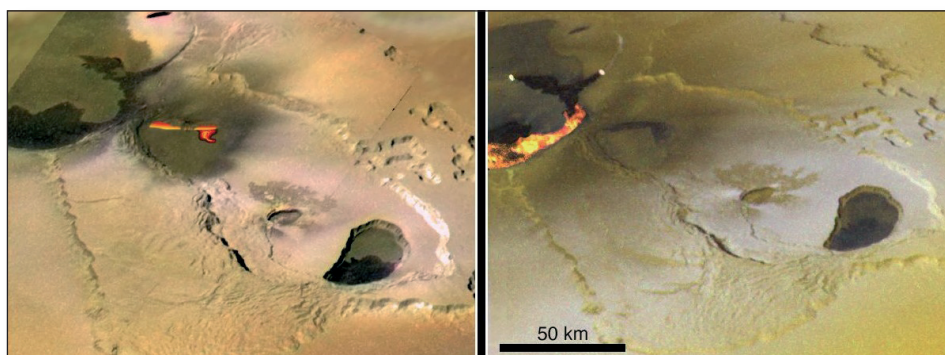
*Figura 22.4. El volcán Loki Patera, justo en el limbo del satélite, emite el 25% de todo el calor que sale de Ío. Erupciones como ésta pueden lanzar gases y material sólido a más de 300 kilómetros de altura. En la parte inferior podemos apreciar el resultado de una de estas erupciones ultraexplosivas: un amplio depósito circular rodeando a un volcán (área más oscura). Esta aureola fue depositada por el volcán Pele en 1997 (ver figura 22.7). Los datos aportados por las naves Voyager y Galileo sugieren que estos volcanes pueden mantenerse activos durante varios meses seguidos (NASA/JPL).*

espacio por esta vía formarían tanto la tenue atmósfera de dióxido de azufre que envuelve Ío como el toro magnético joviano, contribuyendo, además, a la formación del fino anillo de Júpiter.

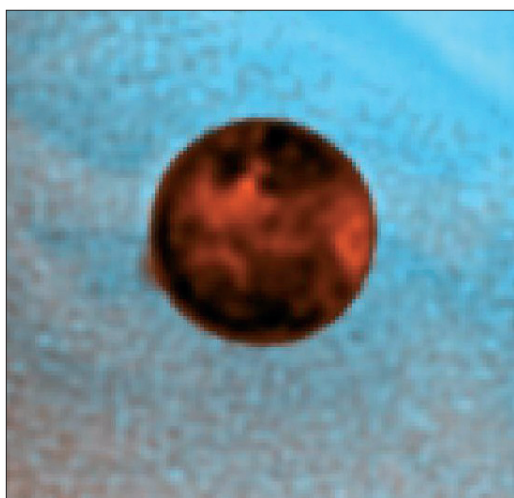
En la historia de la exploración espacial Ío señala un antes y un después conceptual. Su espectacular vulcanismo es la mejor prueba de que ni la descomposición radiactiva ni el calor primordial por acreción, los dos principales motores de la maquinaria geodinámica interna terrestre, son las únicas fuentes



*Figura 22.5. Comparando estas dos instantáneas de las inmediaciones del volcán Pele (zona oscura del centro) se puede apreciar que Pillan Patera, un volcán que permanecía inactivo, ha despertado súbitamente, cubriendo de materiales oscuros una amplia extensión (400 kilómetros de diámetro) de terreno. Hacia el Sur, Babar Patera se encuentra parcialmente cubierto por los depósitos de Pele (NASA/JPL).*



*Figura 22.6. En estas dos imágenes, tomadas con diez meses de diferencia, la actividad de este volcán ha cambiado notablemente. En la imagen de la izquierda es el tercer lago de lava el que está activo, mientras que en la de la derecha el cuarto centro ha tomado el relevo. La alineación de los cuatro centros volcánicos sugiere que este centro de emisión está instalado sobre una zona de fractura (NASA/JPL).*



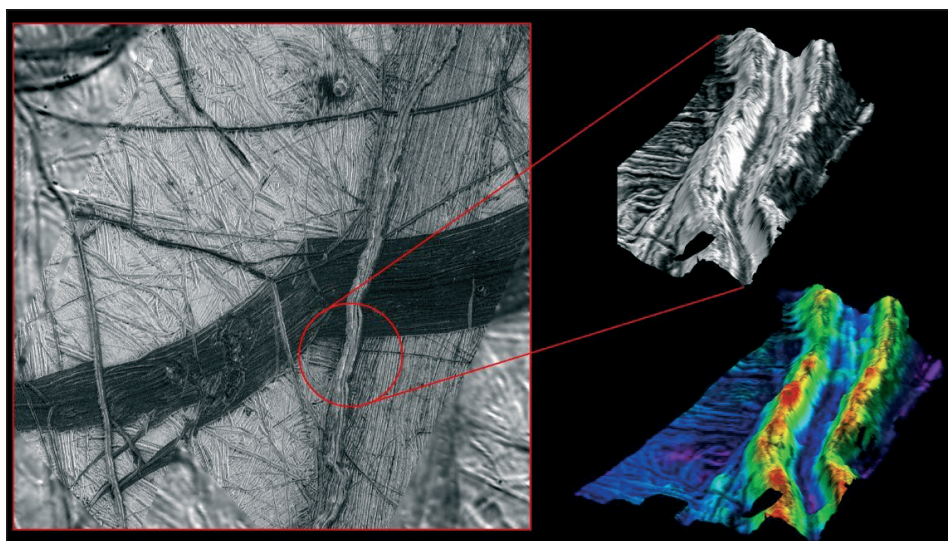
*Figura 22.7. Erupción del volcán Pele fotografiado por el Hubble en 1997. La actividad volcánica de Ío es el resultado de las intensas fuerzas de marea que periódicamente deforman su interior. La energía térmica desprendida mediante este proceso es enorme: en uno de sus volcanes se ha medido una temperatura próximo a los 2.000 °C, la mayor registrada en un cuerpo sólido del Sistema Solar (Lowel Observatory/ NASA).*

de energía interna a disposición de un cuerpo planetario. La idea de que quizá existan mundos con una compleja dinámica geológica inducida exteriormente por efectos de marea, nos abre un vasto horizonte teórico tanto a los geólogos terrícolas como a los buscadores de vida en el universo. Y no necesitamos ir muy lejos para comprobarlo, pues Europa, el satélite vecino más próximo, es quizá el mejor ejemplo.

## UN OCÉANO BAJO EL HIELO

Con una densidad promedio de 3 gramos por centímetro cúbico, Europa revela que no se trata enteramente una bola de nieve, sino de un mundo rocoso cubierto por un manto de agua helada. La temperatura superficial no es homogénea, pues varía entre los -163 °C medidos en el ecuador y los -223 °C registrados en los polos, una diferencia que prueba que también su corteza de hielo está sometida a periódicas fricciones de origen mareal. Al igual que la vecina Ío, el satélite cuenta con una superficie bastante joven, y en base a la densidad de cráteres de impacto descubiertos en las imágenes de alta resolución obtenidas por la nave *Galileo*, se ha podido estimar que la edad media de su corteza es de unos 50 millones de años, un tiempo cortísimo a escala de tiempo geológico.

Europa cuenta con una amplia variedad de terrenos y estructuras geológicas. Por una parte, grandes extensiones del satélite se caracterizan por ser llanuras densamente fracturadas, cruzadas por numerosas crestas y bandas, algunas de las cuales se prolongan a lo largo de varios miles de kilómetros (Figura 22.8). El resto de la superficie se caracteriza por mostrar áreas de aspecto caótico, donde las llanuras con crestas han sido literalmente rotas en numerosos pedazos, y

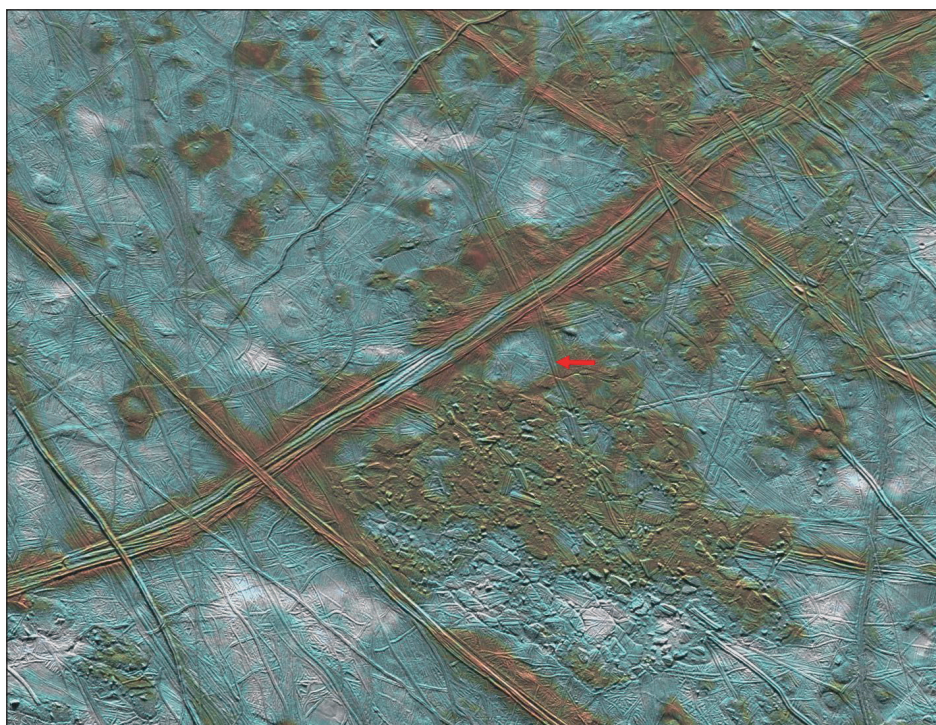


*Figura 22.8. Como se puede apreciar en esta imagen, algunos terrenos de Europa se encuentran completamente saturados de surcos y fracturas. El fuerte relieve del surco ampliado, que se levanta sobre la llanura (el color rojo indica una elevación de 300 m), podría explicarse por su distinta composición o bien por su formación reciente. El color del material que surge de las grietas, y que varía de blanco a oscuro (rojizo, como veremos en otras figuras), significa que el interior del satélite alberga importantes heterogeneidades químicas (NASA/JPL).*

es frecuente observar bloques aislados y desplazados; bloques que recuerdan a grandes icebergs que hubieran flotado en agua líquida o, alternatively, en hielo poco viscoso y relativamente caliente. Estos rasgos morfológicos han sido interpretados como una prueba a favor de la existencia de agua en estado líquido cerca de la superficie o, al menos, de una fusión parcial de la corteza del satélite cerca de la superficie (Figuras 22.9 y 22.10).

Sin embargo, la más firme evidencia a favor de la existencia de un océano bajo la corteza de hielo fue aportada por el magnetómetro instalado a bordo de la sonda *Galileo*. En 1998 la nave descubrió que el campo magnético de Júpiter era alterado en las cercanías de sus satélites Europa y Calisto por campos magnéticos locales, originados secundariamente en éstos por inducción del propio campo magnético joviano sobre capas conductoras de la electricidad situadas cerca de la superficie. Las propiedades de estos campos magnéticos sólo pueden ser explicadas por la existencia de capas globales de agua líquida salada en el interior de estos cuerpos. Como el agua salada es conductora de la electricidad, las corrientes de plasma moviéndose en el intenso campo magnético de Júpiter provocarían la inducción de un campo magnético secundario en un océano subterráneo, y este campo inducido sería responsable de los efectos





*Figura 22.9. Surcos, diapiros y terrenos caóticos. La parte central de la imagen se encuentra desorganizada, aunque los restos de surcos permiten reconstruir algo de la geometría inicial. Este tipo de desestructura se ha llamado terreno caótico, y se atribuye a la llegada a la superficie de una gran cantidad de material caliente que rompe y remueve la corteza. La diferencia entre este proceso y el de formación de diapiros es sólo de magnitud: los diapiros deforman la corteza pero no la rompen necesariamente (p.ej., en el señalado con una flecha se distinguen los surcos previos), mientras que la llegada de gran cantidad de material nuevo la invade y desorganiza. Este material podría ser agua líquida, o bien hielo cercano a la fusión, y por lo tanto con alta capacidad de flujo. Las bandas blanquecinas dirigidas de este a oeste son hielo puro, eyecta de un cráter de impacto lejano, uno de los pocos que marcan la superficie de Europa. (NASA/JPL).*

observados por la nave. Del análisis general del campo gravitatorio de Europa, se cree que esta luna posee una capa de agua subsuperficial de entre 80 y 170 kilómetros de espesor. Sin embargo, estas medidas no pueden distinguir entre agua congelada o líquida, debido a que sus respectivas densidades son muy parecidas, y no son capaces de proporcionar información sobre el espesor y estructura de la corteza de hielo que cubre ese gran océano. Para estimar la profundidad a la que se encuentra, los investigadores se ven obligados a recurrir a métodos indirectos, en su mayoría relacionados con el aspecto que presentan las formas del terreno.



En las proximidades de las zonas donde la corteza está desestructurada y presenta un aspecto caótico, pueden verse unos curiosos rasgos conocidos como *lenticulae*, pecas en latín, en alusión a su aspecto. Este término se utiliza para designar a una serie heterogénea de rasgos circulares, elípticos e incluso de forma irregular que incluyen domos, depresiones y manchas oscuras que, por lo general, tienen un tamaño que va de unos pocos kilómetros a varias decenas y que en algunas regiones se encuentran densamente distribuidos (Figura 22.11). Algunos investigadores consideran a las *lenticulae* como uno de los rasgos geológicos más jóvenes visibles sobre la superficie de Europa. Se han ofrecido diversas hipótesis para explicar su origen. Algunos autores han señalado que estas pecas presentan un diámetro medio en torno a 10 kilómetros, y que su distribución espacial muestra una separación típica estimada entre 15-23 kilómetros, y consideran ambos datos como indicativos de un origen en relación con material caliente (penachos) que ascienden a partir de una capa interna

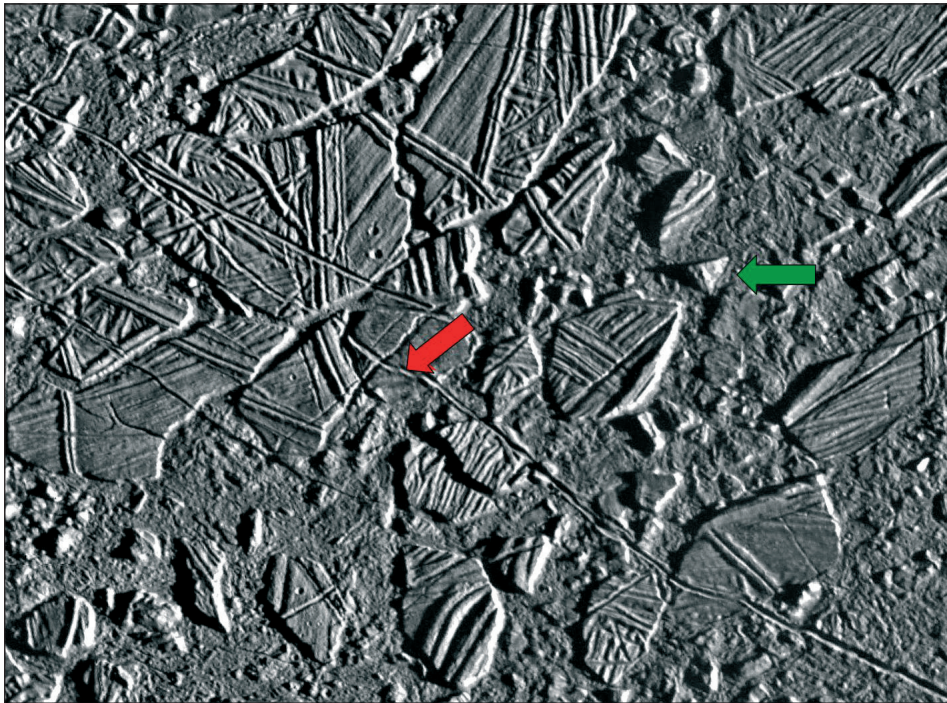


Figura 22.10. Bloques de hielo a la deriva. El océano europeo se ha vuelto a solidificar atrapando otra vez los bloques que habían intentado liberarse. Los mayores de entre estos icebergs tienen hasta 13 km de longitud máxima. El surco marcado con una flecha roja es posterior a la formación del terreno caótico, puesto que lo atraviesa; pero a su vez ha sido roto en una reorganización final. La flecha verde señala un bloque que en su deriva ha volcado y se ha hundido parcialmente (NASA/JPL).

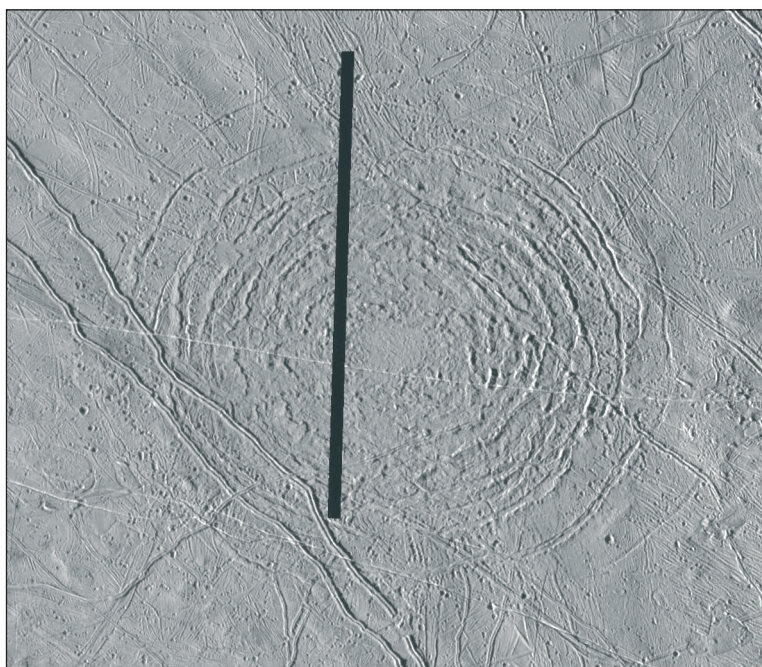


*Figura 22.11. Con frecuencia, la corteza de Europa se ve salpicada de manchas oscuras, que los planetólogos han llamado lenticulae, palabra latina que significa peca. Estas tienen un diámetro promedio de 10 km. La iluminación (desde la izquierda) permite evaluar su relieve, en general positivo. Su color varía entre el blanco del hielo puro y otro rojizo, que análisis espectroscópicos han permitido comparar con algunas sales, como el sulfato magnésico. La hipótesis predominante sobre las lenticulas es que se trata de diapiros de material ligero, probablemente fundido o semifundido, que sube hasta la superficie a través de la corteza (NASA/JPL).*

de hielo en convección situada a una profundidad equivalente a su diámetro medio, es decir, a unos 10-15 kilómetros de profundidad. Otros investigadores consideran que no todos las lenticulae tienen el mismo origen (interpretan que este patrón no es más que un artefacto debido a sesgos observacionales), y defienden un modelo en el que una corteza delgada no convectiva se funde en todo su espesor. Otras propuestas incluyen diapirismo (ascenso de material menos denso) debido a diferencias de composición, o un origen en relación con procesos magmáticos más profundos.

El aspecto de los cráteres de impacto también es un buen parámetro para estimar el grosor de la corteza de hielo. A diferencia de los cráteres con forma de cuenco y base plana que encontramos en otros mundos, las mayores estructuras de impacto de Europa, Tyre y Callanish, de unos 40 kilómetros de diámetro, ofrecen una forma central de terreno caótico rodeada por varios anillos concéntricos. Se ha propuesto que esta peculiar morfología responde a un cambio profundo en el interior del satélite que sólo se manifiesta con las



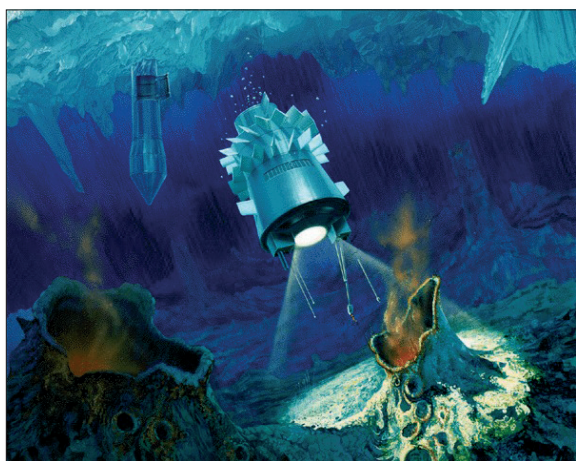


*Figura 22.12. Tyre es una cuenca multianillo. Tras el impacto, la elasticidad de la corteza de hielo duró tan sólo segundos, después de los cuales el material recuperó su rigidez, quedando conservadas, como en una instantánea, sus vibraciones. Se ha especulado sobre la posibilidad de que la existencia de agua líquida a poca profundidad favoreciese el movimiento ondulatorio (NASA/JPL).*

grandes colisiones. Las ondas de choque que crearon estas huellas tuvieron que penetrar en el hielo rígido hasta alcanzar una capa interior más débil. Como la profundidad del cambio corresponde al 75% del diámetro de los cráteres, se ha calculado que la profundidad a la que se encuentra la capa menos resistente es de unos 20 kilómetros, al menos en los lugares y las épocas en las que tuvieron lugar las colisiones (Figura 22.12). Estas estimaciones no son favorables a la existencia de una corteza de tan sólo unos pocos kilómetros de espesor, pero sí son consistentes con una corteza gruesa y convectiva. Sin embargo, con los datos disponibles, nadie puede descartar que unas zonas de la corteza sean más delgadas que otras. Quizá incluso haya regiones donde un pequeño robot de exploración pueda perforar con facilidad la masa de hielo hasta alcanzar el océano interior. ¿Cuándo saldremos de la duda?

## **FUTURO**

La más que probable existencia de un océano de agua en sus entrañas, la presencia de sales y compuestos del carbono, y la interacción de diversas fuentes



*Figura 22.13. Una recreación romántica de la exploración del océano interior de Europa. Los datos que obtenga la misión Europa Orbiter nos confirmarán si éste es realmente un objetivo viable a medio-largo plazo (NASA/JPL).*

de energía, entre ellas la solar, la mareal y la radiogénica, hacen de Europa un lugar especialmente interesante para la búsqueda de vida microbiana. Los excitantes descubrimientos realizados por la nave *Galileo* han desembocado en el planteamiento de nuevos y ambiciosos planes de exploración del sistema joviano. El océano subterráneo de Europa es un objetivo de especial interés científico para las diferentes agencias espaciales. La NASA, especialmente interesada en la búsqueda de vida más allá de la Tierra, está desarrollando el proyecto *Europa Orbiter*, cuyo principal objetivo es cartografiar el campo gravitatorio y el relieve del satélite con el detalle suficiente como para determinar el movimiento de las mareas durante su trayectoria alrededor de Júpiter. Con un océano en el interior, la superficie de Europa registrará movimientos ascendentes y descendentes de 30 metros cada órbita de 3,6 días; de no ser así, el abombamiento será de tan sólo un metro. Una cámara fotografiará con detalle cada palmo de la costra de hielo, y un radar sondeará la corteza en busca de zonas donde el océano se encuentre cerca de la superficie. Según la temperatura del hielo y su pureza, la señal de radar podría incluso atravesar la costra de agua helada y detectar un océano que estuviera debajo. Esta misión, que se estima podría estar lista para el 2008, despejaría cualquier duda sobre la viabilidad de realizar algún tipo de perforación orientada a introducir una sonda en el océano europeo (Figura 22.13). ¿Cuál será la temperatura y composición de este océano? ¿Habrá volcanes en su fondo rocoso? ¿Las aguas serán ácidas o saladas? ¿Existirá alguna forma de vida? Quizá en la próxima década podamos dar respuesta a estas apasionantes preguntas.

## 23. EN EL INFIERNO

Venus es el planeta más próximo a la Tierra en distancia y tamaño. Este hecho, junto a la fuerte carga simbólica que impregnó su significado astrológico y mitológico en la cultura clásica, alentó durante siglos a la ensoñación de un paraíso tropical bajo las nubes que lo envuelven en un halo de misterio. Gracias a la exploración robótica hoy sabemos que Venus es uno de los lugares más terribles e insólitos de todo el Sistema Solar; un corrosivo mundo volcánico donde la presión atmosférica es noventa veces superior a la terrestre, y el calor es tan asfixiante que puede fundir el plomo.

Venus ha sido un mundo desconocido hasta finales del pasado siglo XX. Ya desde las primeras observaciones telescópicas, en las que sólo fue posible descubrir sus fases, se advirtió que este planeta está envuelto por una tupida capa nubosa que en cuatro siglos de exploración no ha dejado entrever ni un solo claro. Las observaciones en luz visible (como la que perciben nuestros ojos o una cámara fotográfica cualquiera a través de un telescopio) no permiten apreciar característica especial alguna, sólo una envoltura completamente blanca y uniforme que refleja cerca del 70% de la radiación solar, reflejo que explica su espectacular brillo a simple vista.

Ante la imposibilidad de obtener información en el espectro visible, los astrónomos decidieron abordar la exploración de Venus con otros ojos o, mejor dicho, con otras longitudes de onda. En los años 30 se realizaron las primeras experiencias de observación mediante cámaras de infrarrojos (aquellas que pueden registrar la luz con longitud de onda superior a las 0,8 micras), trabajos que llevaron al descubrimiento de tenues bandas nubosas, un claro indicio de la existencia de algún tipo de dinámica atmosférica. En 1958 se emprendieron desde Goldston, California, los primeros intentos para conseguir un contacto radar y poder así estimar tanto el diámetro del planeta como la distancia exacta que de él nos separa. La radioastronomía básicamente consiste en dirigir un delgado haz de ondas hacia un objeto y escuchar el eco que genera; y si bien la teoría es sencilla, la práctica no lo es tanto. Las primeras experiencias resulta-



ron un tanto decepcionantes, pero la práctica adquirida (léase persistencia) y la introducción de computadoras para analizar la señal recibida (o sea, el eco), permitieron mejorar los primeros resultados a un ritmo vertiginoso. En poco tiempo a esta empresa se unieron los radiotelescopios de Haystack, del Instituto Tecnológico de Massachussets, y la antena de Arecibo, en Puerto Rico. Así fue como a comienzos de la década de los 60 se llegó a establecer que Venus cuenta con un relieve relativamente poco pronunciado. La radioastronomía también permitió calcular su velocidad de rotación, descubriendo que es muy lenta y retrógrada: un día venusiano dura unos 243 días terrestres (más que el año), y es retrógrada porque el eje de rotación se encuentra inclinado casi 180°, lo que provoca un giro en sentido opuesto al del resto de planetas.

Pero lo que más sorprendió a los astrónomos fue descubrir que Venus emite un máximo de energía al espacio a una longitud de onda inferior a 5 micras (0,000005 metros). Según la Ley de desplazamiento de Wien (llamada así en honor al físico alemán Wilhelm Wien), la longitud de onda del pico de emisión de un cuerpo ( $\lambda$ ), multiplicada por su temperatura termodinámica o absoluta, es una constante:

$$T \cdot \lambda = 0,00290$$

donde la temperatura (T) viene dada en grados Kelvin (K), la longitud de onda máxima ( $\lambda$  se expresa en micras ( $10^{-6}$  metros), y la constante es adimensional. A partir de esta expresión, y conocido el valor de la longitud de onda máxima, se puede estimar fácilmente la temperatura absoluta de un cuerpo, sólo hay que despejar T:

$$T = \frac{0,00290}{\lambda}$$

Para el caso de Venus, que como ya hemos dicho su longitud de onda es inferior a 5 micras, se pudo deducir que la temperatura superficial superaba los 300 grados centígrados<sup>1</sup>. Este valor fue confirmado experimentalmente cuando la nave estadounidense *Mariner 2*, que estaba equipada con un radiómetro (instrumento que permite estudiar el espectro de emisión de un cuerpo), sobrevoló el planeta el 13 de diciembre de 1963, pudiendo establecer que las emisiones registradas por los radiotelescopios terrestres provenían de un suelo cuya temperatura superaba los 400 °C.

---

1. Veamos un ejemplo práctico. Si tomamos por ejemplo un valor de  $\lambda = 4,5$  (en números redondos), obtendremos que:

$$\frac{0,00290}{4,5 \cdot 10^{-6}} = 644,4K$$

Al pasar de grados centígrados a grados kelvin (recordemos que 0 °C = 273 K) comprobamos que la temperatura media global es de 371,4 °C.

## PRIMEROS ASALTOS

Venus ha sido uno de los planetas más visitados, con un balance total de cinco naves estadounidenses y quince soviéticas. La NASA optó por un estudio generalista, tanto de la atmósfera como de la superficie, para lo cual decidió emplear naves de la serie *Mariner* y *Pioneer* equipadas con cámaras de infrarrojo, radiómetros y, posteriormente, con sistemas radar. Por el contrario, la antigua Unión Soviética se embarcó en una empresa mucho más arriesgada, apostando desde el principio por un encuentro directo tanto con la atmósfera como de la superficie, para lo cual puso en marcha un amplio programa de naves conocidas con el nombre de *Venera*, algunas de las cuales fueron equipadas con robustas sondas esféricas destinadas a ser lanzadas a través de la atmósfera.

La primera sonda que logró analizar *in situ* las condiciones ambientales fue la *Venera 8*, que el 22 de julio de 1972 consiguió descender hasta el suelo y emitir desde allí durante 50 minutos antes de quedar completamente destruida (Figura 23.1). La sonda registró una temperatura ambiental de 470 °C, y con los datos que envió a la Tierra se pudo estimar que el 96 % de la atmósfera está compuesta por dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), un valor 30.000 veces superior al nuestro. Este valor es un tanto engañoso, pues la Tierra cuenta con una dotación de  $\text{CO}_2$  igual o superior a la de Venus, por lo que la diferencia entre ambos planetas no estriba en la cantidad, sino en el lugar donde esta molécula



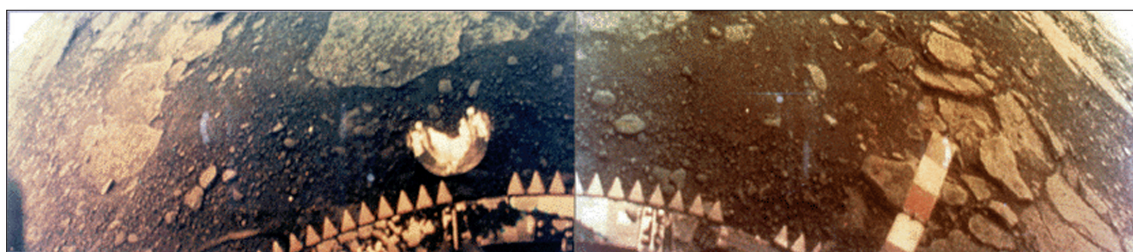
Figura 23.1. Una sonda soviética de la serie *Venera* en la superficie de Venus.

El nebuloso paisaje es un tanto ambiguo porque el cuadro fue pintado por el artista Andrei Sokolov en 1967, años antes de que la comunidad científica dispusiera de una primera fotografía de la superficie de Venus (Hardy, 1989).

se encuentra almacenada. En nuestro planeta el  $\text{CO}_2$  está confinado en la corteza, formando parte de las rocas de carbonato cálcico, principalmente en las calizas ( $\text{CaCO}_3$ ); mientras que en el planeta vecino se halla completamente libre en la atmósfera. Además, la molécula de  $\text{CO}_2$  es mucho más pesada que el nitrógeno ( $\text{N}_2$ ) y el oxígeno ( $\text{O}_2$ ) moleculares que respiramos, y es por ello que la atmósfera de Venus ejerce una presión contra el suelo comparable a la del fondo de un océano de 1.000 metros de profundidad, o al fondo de una piscina con 8 metros de plomo fundido. Esta densa atmósfera de  $\text{CO}_2$  actúa, además, como un invernadero. Las ventanas de cristal de un invernadero dejan entrar la luz solar, pero impiden que las ondas de calor infrarrojas salgan de nuevo por el techo de cristal. El tejado impide también que escape por convección el aire caliente. Por tanto, la energía de la luz solar queda aprisionada en el invernadero y provoca un aumento de la temperatura interna. De modo similar a ese cristal actúa el  $\text{CO}_2$ . Éste es muy transparente a la radiación solar (como demostraron los fotómetros y cámaras de las misiones *Venera 9* y *10*, que en 1975 lograron fotografiar panorámicas del suelo a ras del horizonte), pero es muy opaco a la radiación calorífica infrarroja, dificultando su emisión al espacio.

En 1978 la misión *Pioneer-Venus* lanzó en paracaídas cuatro sondas a través del manto nuboso de Venus con el objetivo de estudiar con detalle la composición y estructura de la atmósfera (no estaban preparadas para recoger datos de la superficie). Comprobaron que las nubes, básicamente compuestas de dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ), vapor de agua y ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), se concentran a una altura comprendida entre 48 y 58 kilómetros, mucho más altas que las nubes terrestres normales. Conforme descendían, descubrieron que las partículas que constituyen las nubes tienen una vida cíclica. Los compuestos del azufre se condensan como diminutos cristales que, a medida que crecen, empiezan a caer en forma de una corrosiva lluvia de ácido sulfúrico. Pero la lluvia de Venus nunca alcanza la superficie. La temperatura aumenta rápidamente desde unos agradables  $13,5^\circ\text{C}$  en las nubes superiores hasta los  $220^\circ\text{C}$  a los 31 kilómetros de altitud. Por tanto, las gotitas se evaporan a medida que caen de las nubes. Ninguna nube subsiste por debajo de esta altura, y tanto las sondas *Pioneer* como las *Venera* observaron un paisaje sorprendentemente claro por debajo de este nivel (Figura 23.2).

En 1974, en su camino hacia Mercurio, la nave *Mariner 10* fotografió la atmósfera de Venus en la longitud de onda del infrarrojo, permitiendo ver por vez primera la disposición espacial de las bandas de nubes de la alta atmósfera. Resultó toda una sorpresa comprobar que las bandas nubosas forman un curioso patrón en forma de *Y* tumbada en el Ecuador (Figura 23.3). Esta estructura se debe a que las regiones ecuatoriales se mueven mucho más rápido que las



*Figura 23.2. El suelo de Venus fotografiado por la nave Venera 13 el 1 de marzo de 1982. La nave captó un total de 14 imágenes antes de quedar totalmente destruida al cabo de 2 horas y 7 minutos de permanencia bajo las infernales condiciones ambientales del planeta. En la imagen se aprecian rocas planas en forma de losa, cantos de diverso tamaño y lo que parece ser una especie de suelo formado por material más fino. La composición de estos materiales es similar a los basaltos, las rocas volcánicas más frecuentes de la Tierra (Glaucosmos/NASA)*

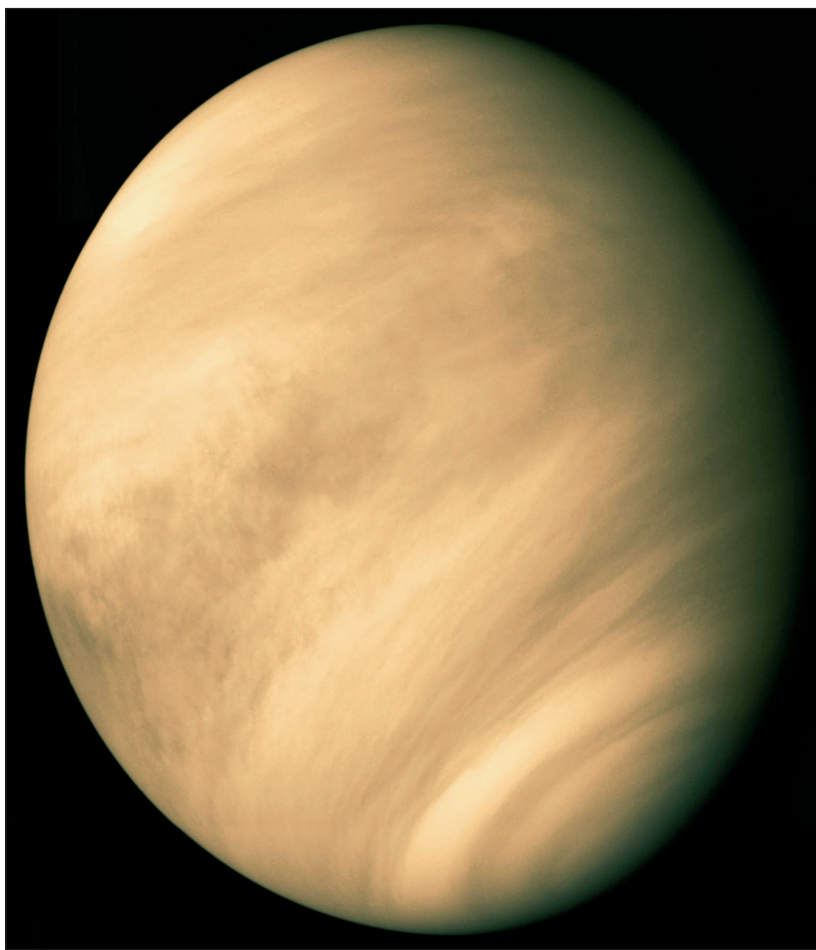
de mayores latitudes. También pudo estimar la velocidad de las nubes, que resultó ser de unos 100 metros por segundo, por lo que rodean al planeta cada 4,2 días, lo que contrasta con la lentísima rotación (recordemos, 243 días) del cuerpo sólido. Esta extraña dinámica plantea serios problemas que podemos resumir en una sola pregunta: ¿cuál es su origen? La dinámica atmosférica terrestre responde a diferencias de temperatura superficial; diferencias térmicas que en Venus, debido al efecto invernadero, no deberían ser tan acusadas. Por el momento no contamos con una respuesta satisfactoria.

### **LA ERA DEL RADAR**

A finales de la década de los 70 la NASA decidió cambiar de estrategia en la técnica de exploración. En 1978 la nave *Pioneer Venus Orbiter* fue la primera nave equipada con un radar que permitió levantar un mapa del 92% de la superficie con una resolución (es decir, el tamaño de los objetos más pequeños que se pueden apreciar) de 200 metros en altura y de 50 a 140 kilómetros de longitud (Figura 23.4). Por primera vez los científicos contaron con un mapa global de Venus, donde se revelaba sin ambigüedades la existencia de relieves escarpados, edificios volcánicos y extensas llanuras de lava. Cinco años después, las naves soviéticas *Venera 15* y *16* levantaron un mapa mucho más detallado, con una resolución de 1 a 2 kilómetros de la región comprendida entre el polo norte y la latitud 30 grados norte. Estas imágenes revelaron evidencias de abundante vulcanismo, cráteres de impacto y complejas deformaciones tectónicas. Pero lo mejor aún estaba por llegar.

El 4 de mayo de 1989 el Trasbordador Espacial *Atlantis* envió a Venus la sonda *Magallanes* (llamada así en honor al navegante portugués que emprendió la circunnavegación de la Tierra), la primera nave equipada con un sistema de

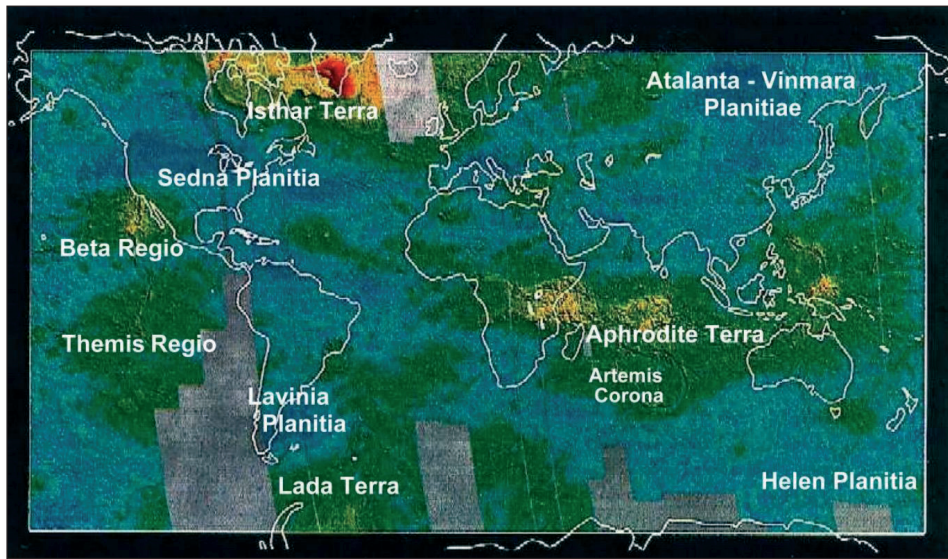




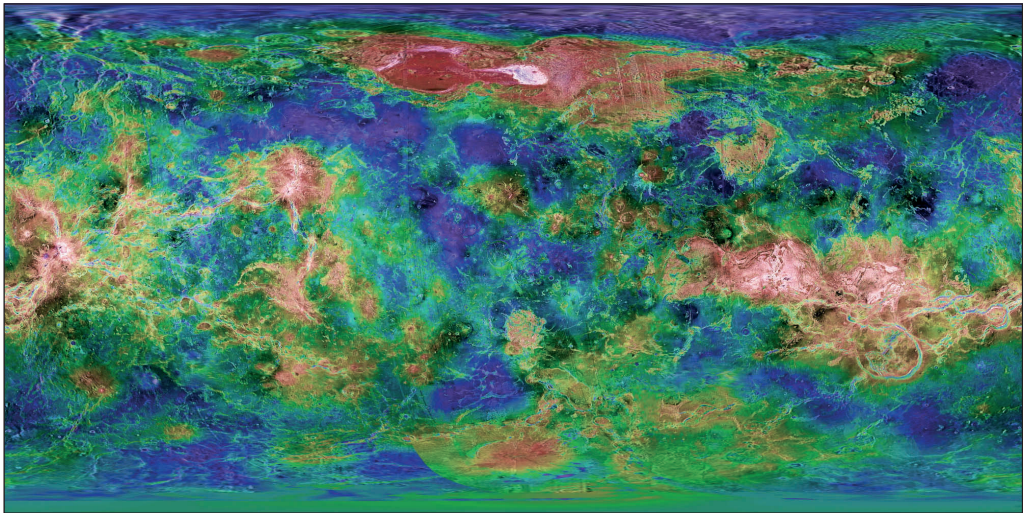
*Figura 23.3. La atmósfera de Venus fotografiada por la nave Mariner 10 en el infrarrojo (NASA/JPL).*

radar de apertura sintética (SAR). Este instrumento aprovecha el movimiento del satélite para mejorar la resolución de las imágenes radar, lo que permitió levantar un mapa del 98% de la superficie venusiana con una resolución que varía entre 250 y 600 metros, generando más datos digitales que el conjunto de todas las misiones planetarias anteriores combinadas. Así pues, las imágenes obtenidas por la Magallanes no son fotográficas, sino imágenes radar basadas en la respuesta del terreno ante un haz de ondas emitido por el SAR. Una parte de esta señal rebota en la superficie y es devuelto a la nave, mientras que otra se pierden en el espacio. El modo en que las señales de radar rebotan en el terreno depende de la rugosidad del mismo: una superficie lisa reflejará el haz como un espejo, y como éste se apunta hacia la superficie formando un ángulo oblicuo,





*Figura 23.4. El primer mapa global de Venus fue confeccionado mediante radar por la nave Pioneer-Venus a finales de la década de los 70. En la imagen se ha superpuesto el contorno de las áreas continentales de la Tierra para apreciar mejor tanto el tamaño como la disposición general del relieve (NASA/JPL).*



*Figura 23.5. Mapa topográfico de Venus confeccionado por la sonda Magallanes en la década de los 90. Las zonas de color rojo se corresponden con las principales alturas del planeta, mientras que en azul aparecen representadas las zonas deprimidas. Como se puede apreciar, el grado de detalle (la resolución) es mucho mayor que el mapa anterior (JPL/NASA).*

se dispersará en direcciones diferentes a la de la nave (en la imagen resultante ese punto de la superficie aparecerá de color negro por ausencia de datos); por el contrario, una superficie rugosa dispersará las ondas en todas direcciones y parte llegará de vuelta a la nave (en la imagen resultante aparecerá como un punto blanco). A la hora de interpretar este tipo de imagen debemos tener en cuenta que la diferencia entre lo que entendemos por liso y rugoso depende en último término de la escala física de las longitudes de ondas de radio, en este caso 12,5 centímetros.

Durante los primeros meses la nave únicamente transmitió una señal continua de radio mientras orbitaba el planeta. Midiendo el desplazamiento Doppler de la señal (cambios en la longitud de onda como resultado de los movimientos relativos entre la nave y la superficie del planeta), fue posible crear un mapa del campo gravitatorio y un mapa de alturas muy preciso. De estas mediciones se desprende que el radio promedio de Venus es de 6.051 kilómetros, y su superficie ha resultado ser muy llana, con casi un 70% de llanuras a menos de 500 metros por encima o por debajo del radio medio del planeta (Figura 23.5).

## UNA EXTRAÑA DINÁMICA GLOBAL

En Venus predominan las extensas llanuras de origen volcánico. De ellas emergen tres zonas de gran relieve que han sido comparadas con los continentes terrestres: Aphrodite Terra y Beta Regio, ambas en el Ecuador; e Ishtar Terra,

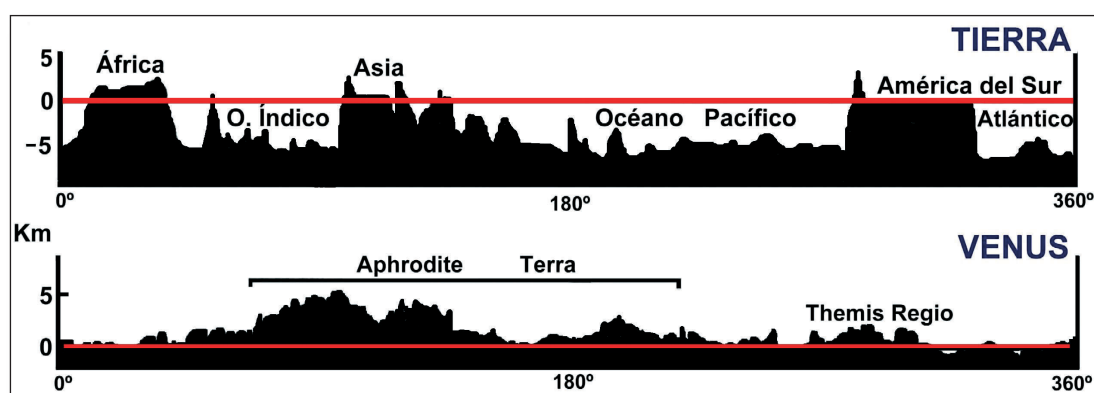


Figura 23.6. Comparación de los perfiles topográficos de la Tierra y Venus. La topografía de Venus abarca una amplia gama de alturas, unos 13 kilómetros de variación desde los terrenos bajos hasta los altos. Es más dentada y las transiciones entre máximos y mínimos son más graduales. Tres quintas partes de la superficie del planeta se encuentran en un margen de 500 m alrededor de la altura media, determinada por un radio planetario de 6.052 kilómetros. Las mayores cotas del planeta se localizan en Ishtar Terra.

(Modificado de Head, 1981)

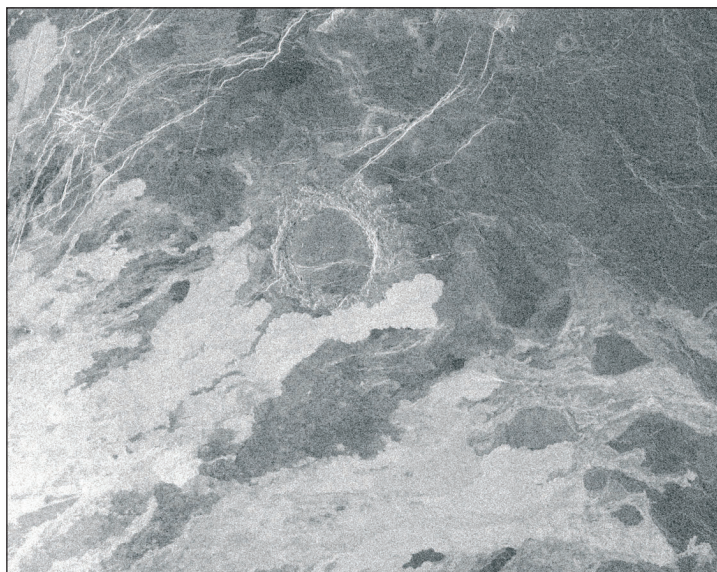
cerca del Polo Norte. En esta última se concentran las mayores elevaciones del planeta, los Montes Maxwell, una cordillera de 6.000 metros de altura y más de 4.000 kilómetros de longitud. La topografía terrestre y venusiana son muy diferentes. En la Tierra existe una clara distinción entre los relieves tabulares de las áreas continentales, que se elevan bruscamente desde los fondos oceánicos, y las cuencas oceánicas. En Venus no existe tal diferencia, no hay continentes ni cuencas oceánicas, por lo que el perfil topográfico es mucho más irregular y las transiciones del relieve son más suaves (Figura 23.6).

En cuanto a su composición, cerca del 70 % de las rocas que podemos encontrar en la superficie de Venus son de origen volcánico, principalmente basaltos. Esta proporción es muy parecida a la terrestre; sin embargo, mientras que aquí la mayoría de los volcanes se enlazan en cadenas siguiendo los límites de las placas litosféricas, en Venus la distribución es completamente aleatoria, lo que se interpreta como una clara evidencia de que la dinámica del planeta no es conducida por una tectónica de placas global, o al menos no con la misma escala e intensidad que en nuestro planeta.

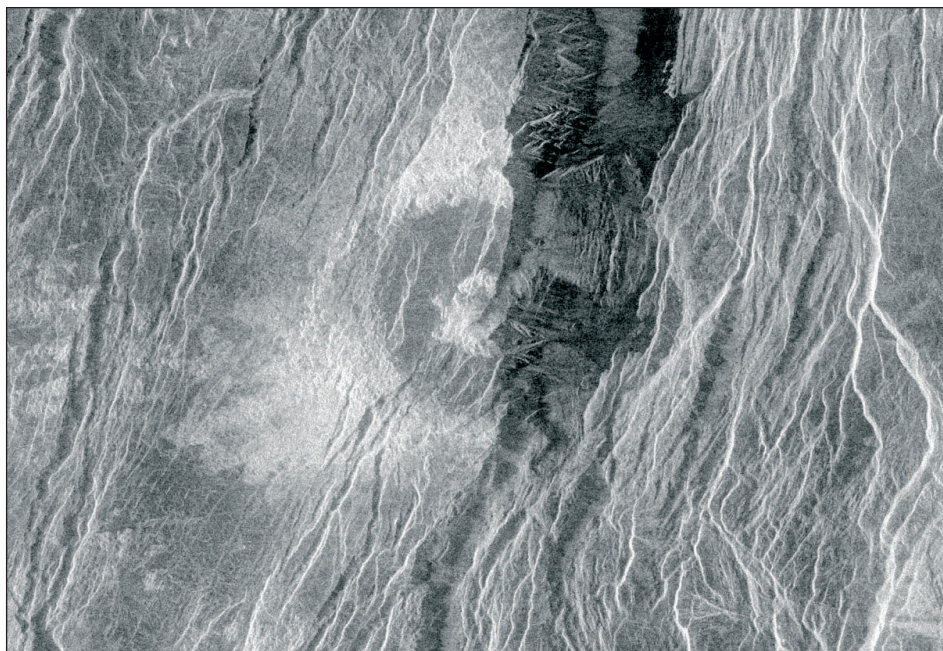
De lo que no cabe duda es que Venus es un mundo geológicamente activo. Aunque ninguna de las veinte misiones ha llegado a registrar en directo una erupción volcánica, existen importantes evidencias indirectas que apuntan a un episodio de vulcanismo muy reciente. A finales de los años setenta, con la llegada de la sonda Pioneer, el investigador Larry W. Esposito, de la Universidad de Colorado, comenzó a medir la cantidad de trióxido de azufre ( $\text{SO}_3$ ) presente en la densa cubierta nubosa de ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). Cuando tiene lugar una erupción volcánica en la Tierra se inyecta a la atmósfera una ingente cantidad de dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) que por oxidación se transforma en  $\text{SO}_3$  y reacciona con el agua para dar ácido sulfúrico. En 1978 la concentración de  $\text{SO}_3$  en la atmósfera de Venus era de 400 ppb (partes por billón), y cinco años después ésta se redujo hasta una décima parte. Es decir: en cuatro años había disminuido en un 90 por ciento. Los modelos sobre química atmosférica indican que Venus debe haber conocido un importante episodio de actividad volcánica hace menos de 30 años, o de lo contrario, a esta velocidad de pérdida, no existirían las nubes de dióxido de azufre y vapor de agua detectadas en la alta atmósfera.

Otra de las evidencias que apuntan a una actividad volcánica reciente es la relación que existe entre la distribución de cráteres de impacto y las numerosas coladas volcánicas que cubren buena parte del planeta. El estudio de los cráteres nos aporta un dato revelador: a diferencia de la Luna o Marte, Venus carece por completo de grandes cuencas de impacto. El número total de cráteres es muy bajo, menos de 1.000, un valor más próximo al estimado para la Tierra (unos 200 reconocidos) que al de Marte, estimado en más de 40.000.





*Figura 23.7 Las extensas coladas de lava del volcán Sapas Mons amenazan con cubrir un cráter de impacto de 20 kilómetros de diámetro. El brillo de las coladas y del borde del cráter es un claro indicio de lo accidentado que debe ser el terreno (NASA/JPL).*



*Figura 23.8. Cráter de impacto Balch, de 37 kilómetros de diámetro, cortado por fallas normales en el rift que separa los montes Theia y Rhea en Beta Regio (NASA/JPL).*

Además, debido a que cuenta con una espesa atmósfera que actúa como una eficaz barrera protectora contra los impactos más pequeños (estadísticamente más frecuentes), casi todos los cráteres de Venus tienen un tamaño superior a los 2 kilómetros de diámetro.

La acción de los procesos geológicos externos es en Venus muy limitada. Su atmósfera, extremadamente caliente y seca, no permite la existencia de lluvia, y la extrema presión atmosférica en superficie sólo permite que los vientos alcancen velocidades de unos pocos metros por segundo (mucho más lento que los 100 metros por segundo detectados en altitudes elevadas), por lo que no llegan a erosionar la superficie con intensidad. Todo ello convierte a los enterramientos por flujos de lava y a la deformación tectónica (fracturas) en los principales mecanismos destructores de los cráteres venusinos, es decir, en los únicos procesos efectivos de rejuvenecimiento de la superficie del planeta (Figuras 23.7 y 23.8).

Pero lo más significativo de los cráteres no es ni su número ni el tamaño, sino su distribución espacial, esencialmente homogénea, que permite estimar la edad media de la superficie de Venus entre 700 y 300 millones de años de antigüedad. ¿Qué proceso térmico puede haber renovado tan eficazmente esta superficie si, como creemos, carece de una dinámica global como la tectónica de placas terrestre? La no existencia de una dinámica de placas global implica que el planeta no puede refrigerar eficazmente su interior, por lo que quizá se esté comportando como una gran olla a presión. La clave para comprender su geología residiría pues en la forma mediante la cual Venus gestiona y se deshace del calor que acumula con el paso de los millones de años.

El geofísico norteamericano Norman Sleep cree que la atmósfera del planeta podría jugar un papel importante en la dinámica de la corteza y la parte superior del manto (la litosfera), pues su elevada densidad permitiría a la litosfera deshacerse eficazmente del calor por convección gaseosa, con lo que el interior se enfriaría con relativa rapidez. Paradójicamente, la misma atmósfera que somete a la superficie a un infernal efecto invernadero, podría estar actuando como refrigerante, aunque de una forma muy poco efectiva. Según este modelo, cuando el interior de Venus se vuelve demasiado frío, los materiales se vuelven más viscosos y la convección se detiene durante millones de años, el mismo tiempo que tarda en volver a calentarse y volver a disminuir su viscosidad. El acontecimiento térmico que rejuveneció el planeta se correspondería con una de estas fases de calentamiento global. Por su parte, el también geofísico Donald Turcotte, propone otra alternativa: a medida que el planeta se enfría su litosfera se hace cada vez más gruesa hasta que su parte inferior se desprende por gravedad, generándose así una delaminación global del planeta mediante avalanchas de placas procedentes del manto hacia



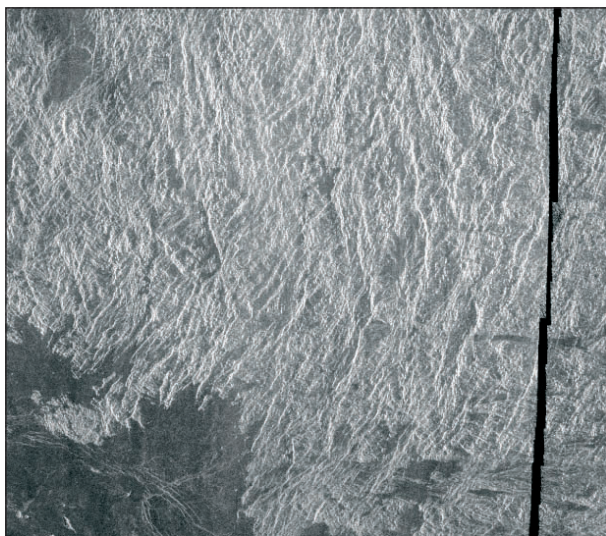


Figura 23.9. Un ejemplo de terreno de tipo tesela. El tamaño de las fracturas oscila entre los 10 y los 60 kilómetros de longitud (NASA/JPL).

el núcleo, un proceso catastrófico que sin duda habría tenido su expresión en superficie mediante la génesis de ingentes cantidades de lava.

### POR TIERRAS DE VENUS

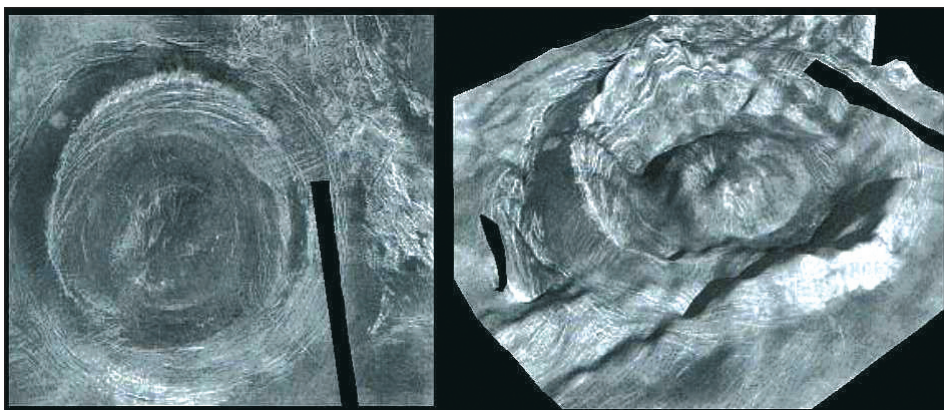
La superficie de Venus está surcada por más de 100.000 pequeños volcanes en escudo y ríos de lava que se extienden inundando miles de kilómetros cuadrados de superficie. Pero, además de estos rasgos familiares para cualquier geólogo terrícola, en el vecino planeta podemos encontrar formas únicas cuyo origen y evolución aún no terminamos de comprender. Veamos algunos ejemplos.

Los terrenos de tipo *tessera* deben su nombre a las teselas o piezas de los mosaicos romanos, y se corresponden con las regiones más antiguas de la corteza de Venus. Se caracterizan por estar muy fracturados, lo que indicaría que son terrenos que han sufrido una intensa deformación. Generalmente se localizan próximas a cadenas de montañas y crestas, y su análogo terrestre serían los cratones continentales (Figura 23.9).

Los planetólogos denominan *coronas* a grandes formaciones (presumiblemente volcánicas) redondas u ovaladas que poseen un característico anillo de fracturas y montañas conocido con el nombre de *annulus*. Generalmente tienen su parte central chata o hundida y el borde exterior levantado. En su interior es común encontrar coladas de lava, volcanes en escudo y domos. El tamaño de las coronas puede ser desde un centenar de kilómetros a más de mil. Se cree que su origen está asociado con penachos de calor que ascienden hasta la superficie directamente desde el núcleo o el manto, pero es difícil saberlo, pues no existen análogos terrestres (Figuras 23. 10 y 23.11).

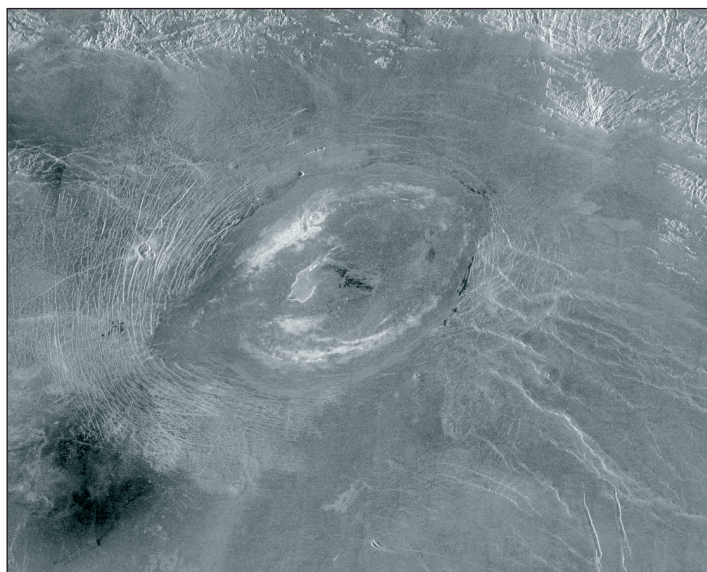


*Figura 23.10. Vista general de la corona Aine, de 200 kilómetros de diámetro. En su interior se aprecian varias estructuras circulares que se corresponden con edificios volcánicos de tipo «pancake» (ver figura 23.14) (NASA/JPL).*

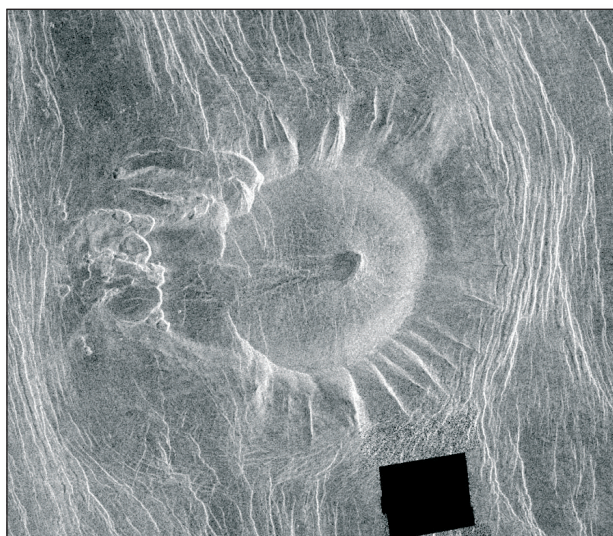


*Figura 23.11. La corona Bhumidevi es una extensa estructura circular de 200 kilómetros de diámetro. La mejor forma de apreciar su verdadero aspecto es mediante un levantamiento tridimensional (derecha). El conjunto de relieves aserrados que delimitan toda la estructura recibe el nombre de annulus (JPL/NASA).*





*Figura 23.12. Sacajawea Patera es una caldera volcánica de 1 a 2 kilómetros de profundidad y 120 X 215 kilómetros de extensión. En Venus se han contabilizado cerca de 150 edificios volcánicos de estas dimensiones (NASA/JPL).*



*Figura 23.13. Peculiar forma volcánica con aspecto de aracnoide. El diámetro de la base es de unos 70 kilómetros, y el de la caldera de 35. En el centro se aprecia un pequeño agujero, presumiblemente el lugar por donde emitió lava durante la última erupción (NASA/JPL).*



*Figura 23.14. Ristra de domos o edificios de tipo pancake al Oeste de Alpha Regio. El tamaño de cada estructura es de 25 kilómetros de diámetro y unos 750 metros de altura (NASA/JPL).*

En Venus se han localizado más de ciento cincuenta volcanes en escudo (grandes edificios de amplia base y pendientes suaves de entre 6 y 12 grados), casi todos cubiertos por largos flujos de lava. El tamaño de la base oscila entre 100 y 600 kilómetros, con alturas comprendidas entre los 300 a los 5.500 metros. En comparación, el Mauna Loa, el volcán más grande de la Tierra, tiene aproximadamente 120 kilómetros de base y una altura total que rebasa los 8.000 metros desde el fondo del Océano Pacífico. Es decir, los grandes volcanes de escudo venusinos son más amplios, pero también más planos que los de la Tierra (Figura 23.12).

Los *aracnoides* son uno de los edificios volcánicos más peculiares del Sistema Solar, pues como su propio nombre indica su aspecto recuerda al de arañas o garrapatas. Algunos investigadores los asocian con las coronas, ya que suelen aparecer cerca de ellas y comparten rasgos en común (aunque a menor escala), como fracturas radiales y anillos. Hasta el momento se han localizado unas 250 estructuras de este tipo, algunas con un diámetro próximo a los 230 kilómetros (Figura 23.13).

Los llamados *pancakes* muestran menos señales de vulcanismo real que las coronas o los aracnoides. En cambio, presentan un dibujo estrellado de fallas y una elevación en forma de domo (Figura 23.14). Algunas de esas fallas parecen haber alimentado flujos de lava, pero este tipo de flujos no son muy habituales. Se han localizado alrededor de 50 pancakes de entre 50 y 300 kilómetros de extensión, aunque la mayoría son de tamaños comprendidos entre los 150 y 200 kilómetros, igual que los aracnoides. Se encuentran próximos a grandes

volcanes o grupos de coronas y aracnoides, por lo que algunos investigadores las interpretan como diferentes estadios evolutivos de un mismo proceso: el ascenso de magma desde el manto formaría domos de tipo pancake, la posterior deformación y fracturación del terreno les haría adquirir aspecto de aracnoide, y por último, un colapso generalizado de la estructura daría lugar a la formación del anillo característico de las coronas.

Todas estas estructuras parecen revelar que Venus es un planeta terriblemente activo y, aunque por el momento no hemos tenido confirmación visual de procesos volcánicos actuales, todo parece indicar que su motor interno continúa funcionando a pleno rendimiento, alimentando una exótica dinámica interna que promete mantener entretenidos a unas cuantas generaciones de exploradores.

## UN ESPERADO RETORNO

El 9 de noviembre de 2005 un cohete *Soyuz-Fregat* lanzó desde Baikonur la sonda *Venus Express*, la primera nave europea de exploración venusiana. Si todo sale según lo previsto en abril de 2006, tras un viaje de 400 millones de kilómetros, esta nave alcanzará su objetivo. Se espera que durante dos días venusianos (unos 500 días terrestres) se centre en el estudio de nueve líneas de trabajo distintas, que van desde el estudio de la composición de la baja atmósfera hasta la aplicación de técnicas de ocultación de algunas estrellas y del Sol, sin olvidar una cartografía completa de la composición de gases atmosféricos y su dinámica a escala global. Muchas son las preguntas que intentará responder: ¿Cómo interactúan atmósfera y superficie? ¿Cómo varía la composición con la profundidad? ¿Podemos encontrar más evidencias de vulcanismo reciente? ¿Qué proceso químico atmosférico absorbe la radiación ultravioleta que procede del Sol? ¿Acaso habrá vida en la atmósfera de Venus? La misión ya está en marcha. Ahora sólo queda esperar.



## 24. MUNDO DESVELADO

Saturno, con sus miles de anillos y decenas de lunas, simboliza toda la belleza que contiene el Sistema Solar. En junio de 2004 la nave *Cassini-Huygens* retomó el testigo de la exploración donde lo habían dejado las naves *Voyager* veintitrés años atrás. Hasta el 2008, fecha en que se prevé que finalice su misión, deberá cumplir un ajustado calendario de encuentros con los principales satélites del planeta. Las cámaras de alta resolución y los sobrevuelos a baja altura nos mostrarán las caras nunca vistas de Encélado, Titán y Japeto; las «nuevas» lunas de Saturno.

A finales de los ochenta, coincidiendo con la euforia provocada por el rotundo éxito del Programa Voyager, la NASA comenzó a planificar el regreso al sistema solar exterior con la creación de un nuevo proyecto: el *Mariner Mark II* (MMII), entre cuyos objetivos estaba enviar una nave a Saturno y una sonda a su satélite Titán. Este ambicioso proyecto comenzó a gestarse en colaboración con la ESA y varios centros de investigación de todo el mundo. Sin embargo, a comienzo de la década de los noventa no corrían buenos tiempos para la Administración Norteamericana, y el presupuesto para el MMII estaba prácticamente pendiente de un hilo. En 1993, el entonces recién elegido Administrador General de la NASA, Dan Goldin, decidió cambiar el rumbo de la política de exploración planetaria. Definió la nueva filosofía de la NASA con un sencillo lema: «*faster, better and cheaper*» (más rápido, mejor y más barato). Con Goldin el tiempo de los proyectos faraónicos y el gasta-todo-lo-que-quieras pasaban a la historia (al menos en teoría, pues en aquella época se dio luz verde al no menos faraónico proyecto para la construcción de la Estación Espacial Internacional). Finalmente, de la noche a la mañana, y tras años de intenso trabajo, el Administrador General decidió sacrificar el regreso a Saturno.

Cuando ya todo parecía perdido, la vieja Europa tomó la iniciativa. La salvación del proyecto, hoy conocido como *Cassini-Huygens* llegó *in extremis* gracias al empeño personal de Jean-Marie Luton, entonces Director General de la ESA. El 14 de junio de 1994 se jugó el todo por el todo en una carta dirigida

al entonces vicepresidente norteamericano Al Gore, con copias al Secretario de Estado de los Estados Unidos y al propio Goldin. En ella se defendía el trabajo realizado durante cinco años por parte de tres Agencias Espaciales, empresas y grupos de investigación de 18 países; un total de 4300 personas entre científicos, ingenieros e investigadores. Luton dejaba claro que la decisión de no regresar a Saturno suponía sacrificar mucho más que una misión de exploración planetaria, estaba en juego la credibilidad de la NASA.

En 1995 el proyecto parecía salir por fin a flote desde el punto de vista político y administrativo, pero aún quedaba un serio problema por resolver. ¿Cómo enviar hasta Saturno un ingenio tan pesado y complejo como el orbitador *Cassini* y la sonda *Huygens*? En el diseño inicial de la misión se contaba con que la alineación gravitatoria Júpiter-Saturno, un fenómeno que sólo se repite cada 20 años y que para aprovecharlo la nave debía ser lanzada hacia el sistema joviano en 1997. Pero los cálculos no salían. La potencia de lanzamiento del cohete *Titán IV-Centauro* no permite enviar directamente tanto peso hasta el gigante de gas. Por segunda vez el sueño de regresar a Saturno se encontraba en serios apuros.



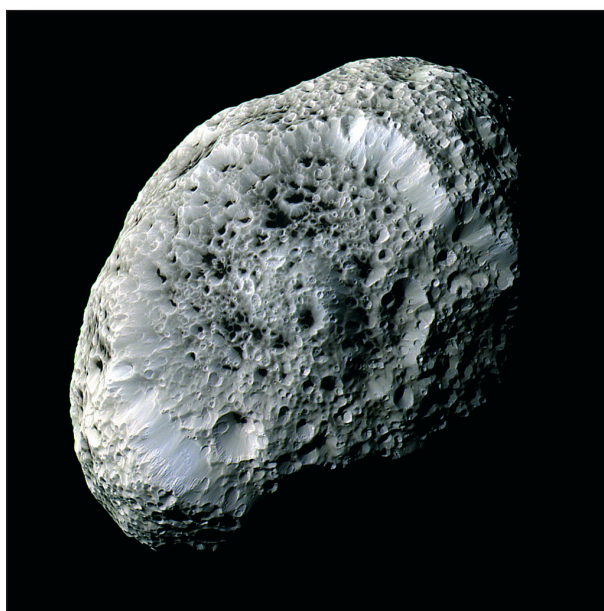
*Figura 24.1. Tenuas nubes, delicadas sombras, anillos y exóticos mundos de hielo hacen del sistema de Saturno un lugar especialmente bello. Debido al ángulo con que fue tomada la fotografía los anillos no se aprecian directamente, pero sí su sombra proyectada sobre las nubes. En la parte inferior se observan las múltiples bandas del anillo C; el tenue anillo F proyecta una fina línea en la parte superior. También se aprecian dos pequeños satélites, Tethys (a la derecha) y Mimas. La imagen fue captada por la nave Cassini el 16 de julio de 2005, desde una distancia de 1,2 millones de kilómetros (NASA/JPL/Space Science Institute).*

En esta ocasión la solución llegó de manos de dos investigadores del *Jet Propulsion Laboratory* (JPL), Roger Diehl y Chen-Wan Yen, que ya contaban con la amplia experiencia de la misión *Galileo* al sistema joviano. Su solución consistía en buscar otro rumbo y jugar una partida de billar cósmico: ¡llegar a Saturno viajando primero a Venus! Calcularon que si hacían pasar la nave por las inmediaciones de Venus en dos ocasiones ésta ganaría suficiente velocidad como para llegar puntual a su cita con Júpiter, y una vez allí, «todo recto» hasta Saturno. Para alcanzar su objetivo la nave debía ser inyectada en una trayectoria del tipo *Venus-Venus-Earth-Jupiter Gravity Assist* (VVEJGA). Y así fue. La nave sobrevoló Venus en abril de 1998 y junio de 1999. Aproximadamente 60 días después pasó cerca de la Tierra y tomó la ruta que habría de conducirla hasta Júpiter. Este encuentro se produjo en diciembre del año 2000 y proporcionó a la nave el último pequeño empujón que necesitaba. Gracias a este complejo juego gravitatorio la nave *Cassini* pudo realizar la maniobra de inserción en la órbita de Saturno el 1 de julio de 2004, más de seis años después de su partida. Desde entonces la nave *Cassini* no ha dejado de asombrarnos con espectaculares instantáneas de los anillos y las lunas de Saturno (Figura 24.1). La misión se desarrolla según lo previsto y los descubrimientos se suceden a un ritmo vertiginoso, a pesar de lo cual algunos satélites se resisten a desvelar sus secretos.

### LA NUEVA CARA DE ENCÉLADO...

Las nuevas imágenes de las lunas de Saturno han sumido a los geólogos planetarios en la más absoluta perplejidad. El veterano explorador de mundos Torrence V. Johnson, miembro del equipo que analiza las imágenes enviadas por la nave *Cassini*, en unas declaraciones para la revista *Science* aseguró que los paisajes que hoy descubrimos en las lunas de Saturno «son mucho más extraños de lo que pensábamos en 1981». Las pruebas son contundentes: escarpados relieves que alcanzan los 20 kilómetros de altura y los 1.400 kilómetros de longitud, mundos-esponja (Figura 24.2), evidencias de colosales impactos (Figura 24.3) y de intensa actividad volcánica..., paisajes de gran belleza y complejidad entre los que destaca Encélado, el gran enigma del sistema de Saturno.

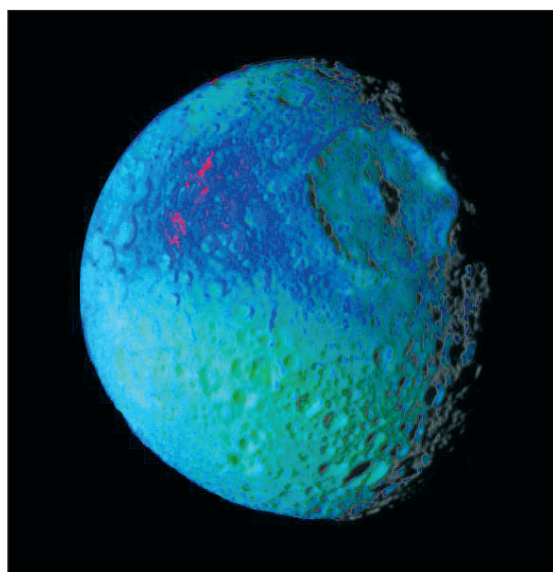
A pesar de su pequeño diámetro, apenas 500 kilómetros, y estar constituido básicamente por hielo de agua, Encélado no es el mundo inerte que debería ser. La blancura de su superficie y las intensas deformaciones que surcan su corteza (Figura 24.4) pusieron en evidencia, ya en la década de los 80, que en contra de todo pronóstico la maquinaria geológica de esta pequeña luna ha permanecido en funcionamiento hasta tiempos muy recientes. El descubrimiento de una anómala concentración de partículas de hielo en el anillo E de Saturno, el más próximo al satélite, hizo sospechar la posible existencia



*Figura 24.2. El 26 de septiembre de 2005 la nave Cassini obtuvo esta espectacular vista de Hiperión, un mundo irregular (328 x 260 x 214 kilómetros) con aspecto de esponja. Los estudios preliminares estiman que su densidad es sólo un 60% de la del hielo de agua, lo que sugiere que más del 40% de su interior debe ser espacio vacío. Esta baja densidad también indica que el satélite está básicamente formado por hielo de agua. El material oscuro que se observa es, por tanto, un componente minoritario, posiblemente proveniente de impactos, al igual que en Japeto. Debido a su pequeña gravedad, se estima que los restos eyectados con suficiente energía no vuelven a caer sobre esta pequeña luna. En su lugar son atraídos hacia Titán, contra el cual terminan impactando (NASA/JPL/Space Science Institute).*

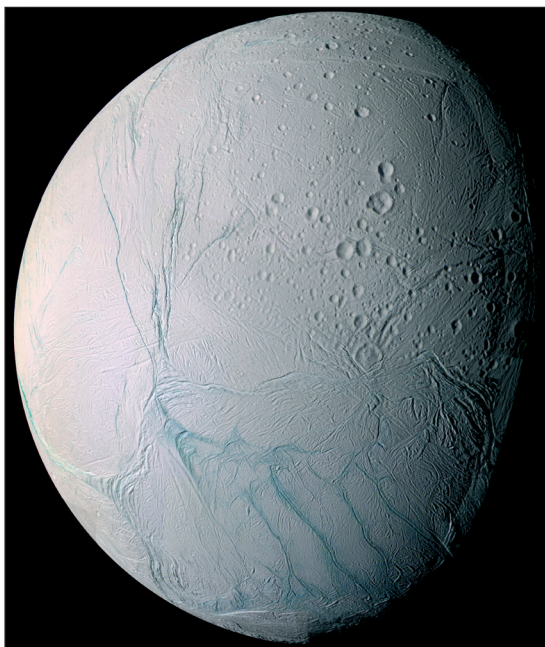
de algún tipo de actividad volcánica capaz de inyectar este tipo de materia al espacio. Sin embargo, la ausencia de intensas resonancias orbitales como las que experimentan Ío, Europa y Ganímedes, así como una densidad de 1,1 gramos por centímetro cúbico (totalmente incompatible con la existencia de rocas portadoras de elementos radiactivos en su interior) hacían suponer que su juventud y actividad no eran sino aparentes. ¿Estaríamos siendo testigos de los últimos estertores de un mundo ya agonizante?

La respuesta es no. Las imágenes de alta resolución obtenidas por *Cassini* evidencian que Encélado mantiene su motor geológico a pleno rendimiento. Las intensas deformaciones tectónicas (Figura 24.5), las profundas grietas, los géiseres de color oscuro (24.6) y su prístina superficie sin cráteres de impacto hablan por sí solos. En algunas regiones del satélite la media de edad podría ser inferior a cien millones de años, mucho más joven que la terrestre. La primera prueba de que su motor interno continúa funcionando a pleno rendimiento llegó a primeros de marzo de 2005, cuando *Cassini* sobrevoló su superficie a

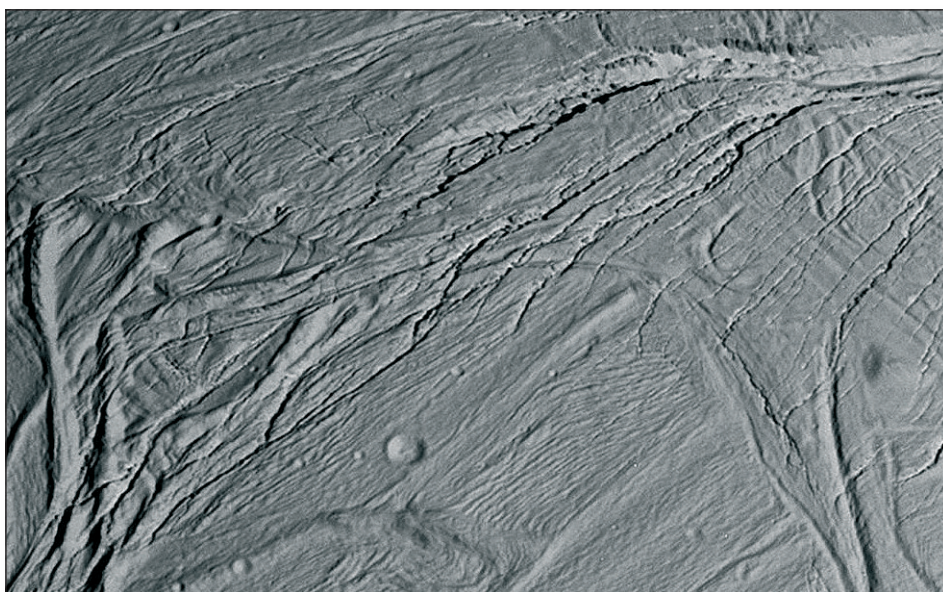


*Figura 24.3. Esta imagen en falso color (multiespectral) de Mimas revela variaciones de composición y textura en toda su superficie. El cráter Herschel, de 140 kilómetros de diámetro, muestra un prominente pico central y un interior relleno de material de color (falso color) azul. Las diferencias de tonalidad indican que el material no se encuentra uniformemente repartido alrededor de Herschel. El origen de estas diferencias de color (y en último término de las propiedades de los materiales que las producen) podría responder a una distribución irregular de los escombros que fueron expulsados del interior del cráter cuando éste se formó. (NASA/JPL/Space Science Institute).*

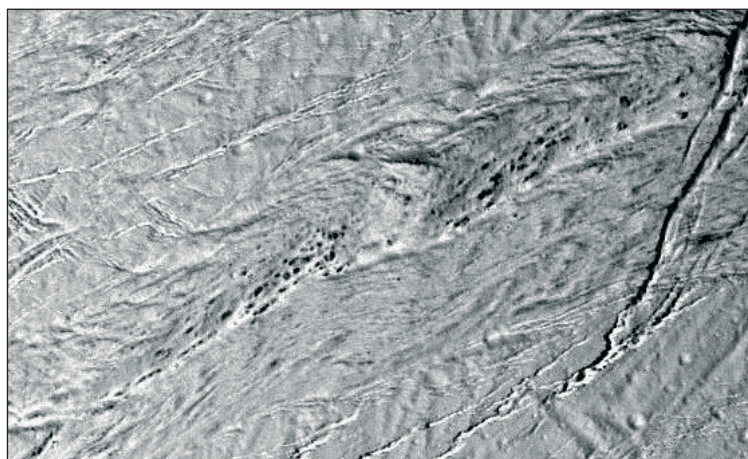
*Figura 24.4. Vista general de Encélado. Esta imagen es un mosaico de 21 fotografías tomadas en varias longitudes de onda, del infrarrojo al ultravioleta. La mayoría de las grandes fracturas muestran bordes azulados, un claro indicio de que el hielo se encuentra significativamente más caliente en estos puntos de la corteza. El sistema de fracturas paralelas que se observan en el hemisferio Sur recibe el nombre (no oficial) de «las rayas del tigre». Los datos obtenidos por la nave Cassini indican que se trata de una de las zonas volcánicas más activas del satélite (NASA/JPL/Space Science Institute).*







*Figura 24.5. Intensas deformaciones en la corteza de Encélado. En la parte superior derecha destaca una gran grieta de 5 Kilómetros de ancho en cuyas paredes se aprecia una capa de hielo superficial de color gris oscuro. En la parte izquierda se observa una compleja red de arrugas (pliegues) muy ramificadas que se extienden de Sur a Norte. Esta imagen cubre un área de 5.000 Km<sup>2</sup> (NASA/JPL/Space Science Institute).*



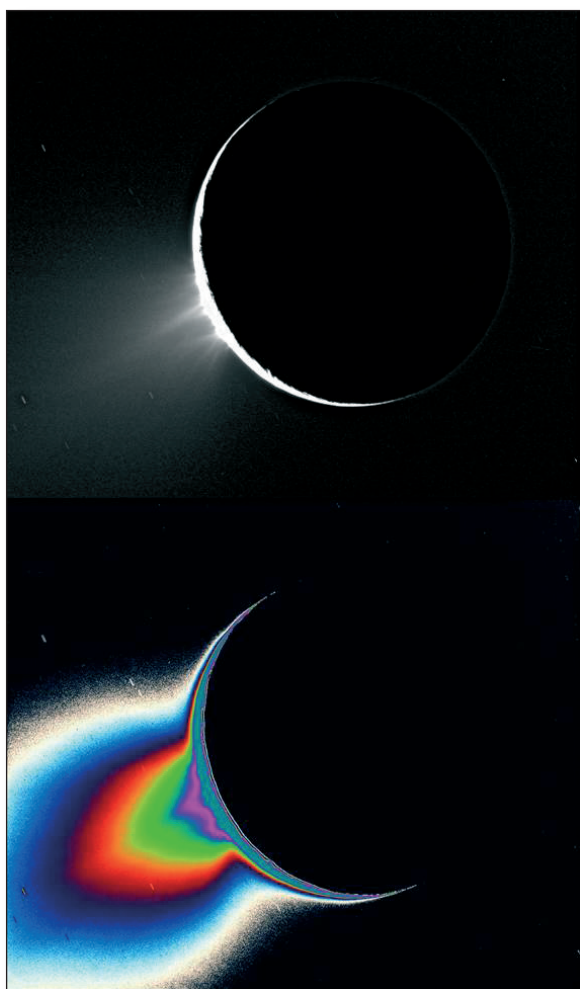
*Figura 24.6. Cassini ha fotografiado deformaciones de la corteza de Encélado tan complejas como el que se aprecia en esta imagen. A lo largo del eje principal de la estructura que corta diagonalmente la fotografía, se aprecia una alineación de pequeñas manchas oscuras de unos 125 a 750 m de diámetro, posiblemente géiseres o algún otro tipo de manifestación criovolcánica (vulcanismo de hielo) (NASA/JPL/Space Science Institute).*

menos de 500 kilómetros de distancia. El magnetómetro de la nave detectó entonces que el campo magnético de Saturno experimenta variaciones en las proximidades del satélite debido a la presencia de plasma ionizado, lo que quiere decir que Encélado se encuentra envuelto por una tenue atmósfera de vapor de agua. Sin embargo, puesto que se trata de un cuerpo de pequeño tamaño, su gravedad es insuficiente para retener una atmósfera durante mucho tiempo. Los especialistas sólo encuentran una explicación coherente para este descubrimiento: el vapor de agua debe haber sido inyectado en el espacio a través de algún tipo de manifestación volcánica reciente, quizá actual; básicamente el mismo modelo que se propuso en los años 80 para explicar la anómala concentración de partículas detectada en el anillo E.

La confirmación definitiva se produjo en julio de 2005, cuando el espectrómetro de infrarrojo de la nave detectó varias fuentes de calor localizadas en el hemisferio Sur, en una región surcadas por extensas grietas (apodadas *rayas de tigre*) de más de 100 kilómetros de longitud y unos 6 kilómetros de ancho (Figura 24.4). Las temperaturas registradas en el interior de las fracturas son del orden de 20 grados más calientes que las del terreno circundante, una prueba irrefutable de que aún se encuentran activas. El calor que emana a través de ellas calienta la superficie y favorece la sublimación del hielo, liberando así el vapor de agua que constituye su tenue atmósfera.

Pero las imágenes más emocionantes aún estaban por llegar. El 27 de noviembre de 2005 la sonda espacial fotografiaba en directo varios chorros o géiseres de finas partículas de hielo disparadas hacia el espacio desde el polo Sur (Figura 24.7). Las imágenes muestran que los chorros más débiles se extienden unos 500 kilómetros sobre la superficie de hielo. Para un explorador planetario no hay nada que pueda compararse con la visión de actividad volcánica en otro cuerpo del Sistema Solar. Encélado pertenece por derecho propio al selecto club de los mundos activos, un club del que sólo forman parte (por el momento) Ío, Tritón y la Tierra.

La nave también ha experimentado leves alteraciones de su órbita al aproximarse a Encélado, lo que viene a poner de manifiesto que la densidad de esta luna es de 1,2 gramos por centímetro cúbico, algo mayor de lo estimado en la década de los 80. Algunos investigadores creen que éste es un claro indicio de que en su interior puede haber cierta cantidad de roca y, por lo tanto, de isótopos radiactivos. Se ha propuesto la existencia de potasio-40 en estas rocas, junto con una cantidad significativa de amoníaco, sales y otros compuestos que pueden estar actuando como anticongelantes planetarios, lo que ayudaría a explicar el origen de las deformaciones y la reciente actividad volcánica descubierta. Sin embargo, esta hipótesis por sí sola no justifica la intensa actividad geológica del satélite. Encélado no encaja en los actuales



*Figura 24.7. Erupción en Encélado. Los chorros de partículas de hielo que se observan en estas imágenes (captadas en diferentes longitudes de onda para apreciar mejor los detalles), proceden del hemisferio Sur del satélite, del sistema de fracturas conocido como «las rayas del tigre» (ver figura 24.4) (NASA/JPL/Space Science Institute).*

modelos sobre evolución térmica de mundos de hielo. Como afirma Carolyn Porco, líder del equipo de imágenes del Instituto de Ciencias del Espacio en Boulder, Colorado: *«Esta luna está poniendo a prueba nuestra comprensión del funcionamiento interno de los satélites, pero nos gusta que lo haga»*... Después de todo, ¿no es lo mejor que podía pasar?

### ... Y DE JAPETO

Debido a la extraña mancha de color negro que cubre buena parte de su superficie, Japeto es uno de los mundos de hielo que más interés despierta entre los investigadores planetarios. Las especulaciones sobre el origen y composición de la misma ha dado lugar a varias teorías que, en líneas generales, se pueden sintetizar en dos: las que defienden un origen endógeno, según las



cuales una hipotética actividad volcánica o un gran impacto habrían liberado y transportado el material oscuro desde el interior del satélite hasta su superficie; y aquellas que por el contrario proponen un posible origen exógeno, o sea, aquellas que sostienen que el material procede en realidad del espacio, quizá de Phoebe, un satélite próximo. Las naves *Voyager* sólo pudieron fotografiar una cara de Japeto, por lo que los investigadores no tuvieron la oportunidad de contrastar estas ideas hasta el 31 de diciembre de 2004, tras casi veinte años de paciente espera.

El «otro lado» de Japeto no ha decepcionado a nadie, pero tampoco ha servido para despejar las dudas de la comunidad científica. En las imágenes de alta resolución no se ha observado edificio volcánico alguno ni cráteres de especial singularidad; pero sí una gran cresta (la parte superior de una arruga de la corteza) de unos 1.400 kilómetros de longitud y 20 de altura, sin duda una de las mayores deformaciones tectónicas del Sistema Solar (Figura 24.8).

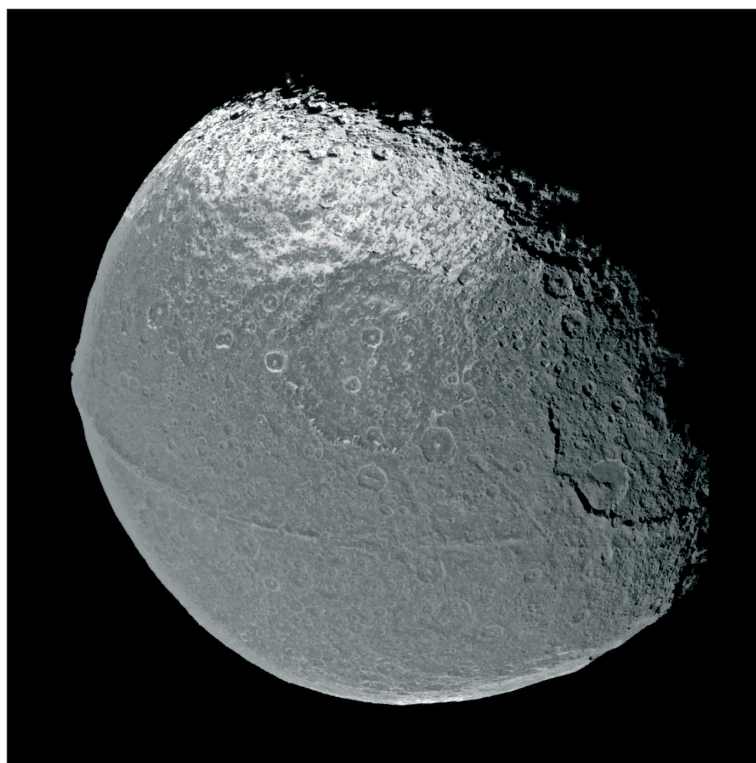


Figura 24.8. El 31 de diciembre de 2004, tras dos décadas de espera, Cassini fotografió la cara oculta de Japeto. En ella se observa una gran cresta de 1.400 kilómetros de longitud y 20 de altura. Su edad y origen son por el momento un misterio. (NASA/JPL/Space Science Institut)

Su edad y origen son por el momento un misterio. El análisis de estas imágenes ha confirmado que el material negro parece haber caído sobre la superficie, pero por el momento se desconoce tanto su procedencia como la composición exacta del mismo. Los primeros resultados publicados parecen apoyar la hipótesis que defiende un origen exógeno, aunque los datos siguen sin ser concluyentes. Parece que Japeto, la que fuera Puerta de las Estrellas en la versión novelada de 2001. *Una Odisea Espacial*, no revelará sus secretos fácilmente.

## BAJO EL VELO DE TITÁN

Titán es el único satélite del Sistema Solar que cuenta con una atmósfera importante. Descubierta en 1907 por el astrónomo catalán Josep Coma Solà desde el Observatorio Fabra del Tibidabo, en Barcelona, hoy sabemos que esta envoltura gaseosa es mucho más densa que la terrestre y alcanza en superficie 1,6 atmósferas de presión (equivalente a la que podemos experimentar en el fondo de una piscina). Su componente mayoritario es el nitrógeno (85%), como en la Tierra, pero en Titán además está acompañado por argón (12%) y metano (1%). Entre los 150 y los 200 kilómetros de altura se forma una espesa niebla de hidrocarburos, presumiblemente sintetizados por la radiación solar a partir del metano, que impide ver cualquier rasgo morfológico de su superficie. Sólo con radar e infrarrojo podemos tener acceso a ella. Ahora bien, ¿cómo puede un cuerpo con un tamaño y una gravedad menor que la de la Tierra retener una atmósfera tan densa? El secreto reside en dos conceptos: velocidad de escape y temperatura.

La velocidad mínima que requiere cualquier objeto (sea éste una nave espacial, una molécula de gas o un fragmento de roca) para escapar de un campo gravitatorio, recibe el nombre de velocidad de escape. La velocidad de escape de un cuerpo puede calcularse mediante la siguiente expresión:

$$V = \left( \frac{2 \cdot G \cdot M}{R} \right)^{1/2}$$

En esta fórmula  $V$  representa la velocidad de escape,  $G$  es la constante de gravitación universal,  $M$  es la masa del cuerpo que genera el campo gravitatorio y  $R$  es el radio de ese mismo cuerpo. Así, para el caso concreto de nuestro planeta, cualquier cohete necesita superar una velocidad de 11,2 metros por segundo para lograr enviar un satélite o a un astronauta fuera de la Tierra. Como podemos apreciar la velocidad de escape depende siempre del tamaño y la masa del astro, nunca de las propiedades del objeto que se lanza.

El comportamiento de un gas es el resultado de los movimientos desorganizados de innumerables moléculas regidas por las leyes de la termodinámica.



En este marco teórico, el concepto de temperatura se define para caracterizar la energía cinética o de movimiento de las moléculas. Así, cuanto más rápidos y caóticos son los movimientos de las moléculas más alta es la temperatura. Si éstas logran rebasar la velocidad de escape, bien porque sean aceleradas debido a un impacto con otra molécula o por la acción de un campo eléctrico, éstas pueden llegar a perderse en el espacio. Podemos afirmar por tanto que para que un planeta o satélite cuente con una atmósfera significativa la velocidad de las moléculas que la constituyen debe ser inferior a la velocidad de escape de ese cuerpo. O dicho de otro modo, para que una atmósfera permanezca ligada de forma estable a un planeta o satélite, su temperatura no debe rebasar un determinado valor crítico.

De forma simplificada, y uniendo los conceptos de velocidad de escape y temperatura, los especialistas consideran que un cuerpo planetario podrá retener una atmósfera siempre y cuando se cumpla la siguiente condición:

$$\frac{K \cdot T}{m} \ll \frac{G \cdot M}{R}$$

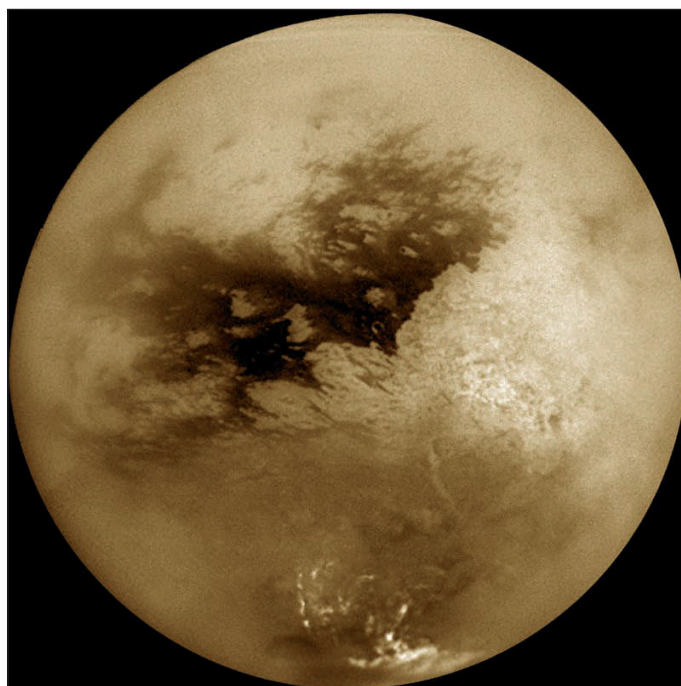
donde  $K$  es una constante (la constante de Boltzman, sobre la cual no entraremos en detalles),  $T$  es la temperatura de la atmósfera,  $m$  es la masa de las moléculas de gas y el símbolo  $\ll$  significa «mucho menor». En resumidas cuentas, esta expresión nos viene a decir que un planeta o satélite cualquiera podrá retener una atmósfera siempre y cuando se cumpla al menos uno de estos tres supuestos: o la masa del astro es muy grande, o la temperatura de la atmósfera muy baja, o bien la masa de las moléculas que la constituyen es muy elevada. La atmósfera de Titán encaja perfectamente en el segundo de los supuestos, pues su temperatura es de  $-180\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Lo que no resulta tan evidente es por qué otros satélites del Sistema Solar exterior de características similares, como Ganímedes o Calisto, no cuentan con un manto nuboso parecido al de Titán. En este caso entra en juego un factor muy importante que podemos definir como la capacidad intrínseca de un cuerpo para crear y mantener una atmósfera por actividad geológica, vulcanismo fundamentalmente, como el que tiene lugar en Encélado. ¿Significa esto que Titán es además un cuerpo volcánicamente activo? Los primeros resultados obtenidos por los sobrevuelos de la nave *Cassini* y la sonda planetaria *Huygens* así lo confirman.

## EL TITÁN NUNCA IMAGINADO

Situado a más de 1.500 millones de kilómetros del Sol, Titán es un mundo muy frío. Sólo llega hasta él un uno por ciento de la insolación que alcanza a la

Tierra, razón por la cual bajo su densa niebla de hidrocarburos su superficie se halla sumida en una penumbra perpetua. Los primeros intentos por desvelar su verdadero aspecto se remontan a la década de los ochenta, cuando el análisis de las señales de radar enviadas desde la Tierra mostraron ecos (respuestas) propias de la superficie irregular de cualquier satélite de hielo. Entre 1994 y 1998 el Telescopio Espacial Hubble también se aplicó a esta compleja tarea de exploración, y con la ayuda de la cámara de infrarrojo cercano se lograron identificar cambios de brillo e irregularidades del terreno de dimensiones continentales. A la mayor de todas, localizada en la región ecuatorial, se la bautizó con el nombre de Xanadú Regio.

El 26 de octubre de 2004 *Cassini* pasó a una distancia de 2.500 kilómetros del satélite y captó las primeras imágenes radar de la superficie (Figura 24.9). Éstas han puesto de manifiesto lo que muchos investigadores sospechaban: Titán es un mundo con una compleja y larga historia geológica. Su superficie no muestra evidencias de grandes cuencas de impacto, tampoco está cuajada



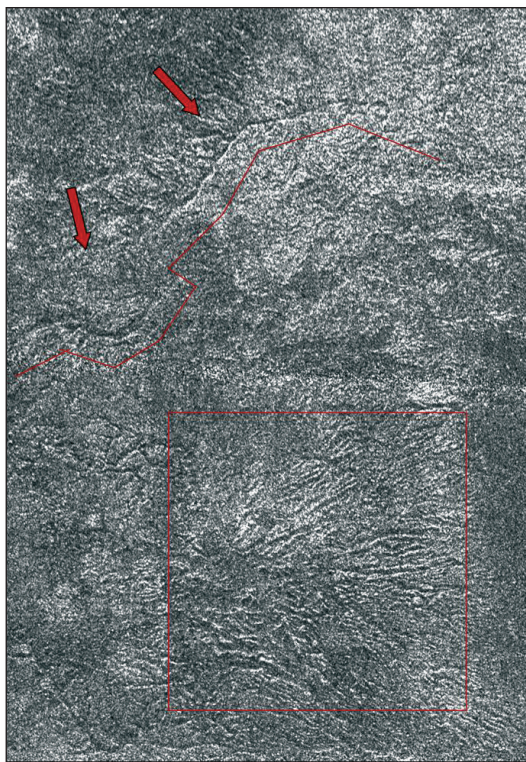
*Figura 24.9. Titán desvelado. Mosaico de nueve fotografías procesadas para atenuar los efectos de la atmósfera y resaltar los rasgos de la superficie del satélite. La fotocomposición pierde nitidez desde el centro hacia los bordes debido al ángulo en que se encontraba la nave Cassini en el momento de captar las imágenes. Esta primera visión de conjunto nos muestra una interesante gama de formas y paisajes aún por explorar. La ausencia de grandes estructuras de impacto nos hace suponer que éste es un mundo geológicamente activo (NASA/JPL/Space Science Institute)*

de cráteres; la topografía global es bastante irregular y se aprecia con claridad la existencia de largas fracturas (fallas) en la corteza. Aunque se intuyen formas circulares, quizá debidas a antiguos impactos, la mayor parte del terreno parece relativamente joven. Ya en las primeras imágenes se aprecian rasgos que recuerdan a estructuras de flujo (ríos) de origen desconocido (Figura 24.10).

El 14 de enero de 2005, trescientos cuarenta años después del descubrimiento de Titán por Huygens, una sonda planetaria, bautizada con el mismo nombre de este astrónomo, se posaba sobre la superficie del satélite de Saturno, después de haber viajado durante casi siete años enganchada a su nave nodriza. Nadie puede dudar del éxito tecnológico que supone lograr que un ingenio automático de poco más de 300 kilos de masa sobreviva al descenso por una atmósfera ciertamente inhóspita y logre transmitir información a la Tierra durante seis horas desde una superficie cuya temperatura ambiental es de 180 grados bajo cero.

Tras dos horas y media de descenso la sonda Huygens se posó sobre un terreno blando formado por agua helada empapada con metano y sucia por la presencia de hidrocarburos. Las primeras imágenes a ras de suelo muestran una llanura en la que abundan los cantos de hielo de entre 5 y 20 centímetros de longitud, muchos de los cuales muestran bordes redondeados, señal inequív-

*Figura 24.10. En esta imagen de radar de la superficie de Titán se aprecian canales (ver línea roja paralela a uno de ellos) con afluentes (flechas rojas) y estructuras de flujo bastante complejas (interior del recuadro). Este es un claro indicio de que algún tipo de fluido ha circulado por la superficie de un mundo cuya temperatura superficial alcanza los  $-180^{\circ}\text{C}$ . El canal de mayor tamaño de esta imagen tiene una anchura de 1 kilómetro, una profundidad de 200 metros y una longitud de 200 kilómetros. Las dimensiones generales de las estructuras y la existencia de canales tributarios (afluentes), demuestran que el fluido que los formó fue lo suficientemente estable como para erosionar y transportar los materiales una gran distancia. Las redes de drenaje complejas sugieren la existencia de lluvias (NASA/JPL/Space Science Institute).*





*Figura 24.11. Primera imagen de la superficie de Titán, captada por la sonda europea Huygens el 14 de enero de 2005. En primer plano se observan cantos de hielo de entre 5 y 20 centímetros de longitud, muchos de los cuales muestran bordes redondeados, señal inequívoca de desplazamiento por rodadura. En el desplazamiento de estos cantos ha debido intervenir algún tipo de fluido, posiblemente metano líquido. Una prueba más de la intensa actividad fluvial que ha conocido (y quizá aún conozca) este satélite. (NASA/JPL/ESA/University of Arizona).*

voca de desplazamiento por rodadura (Figura 24.11). La velocidad del viento registrada en la superficie es de apenas 5 kilómetros a la hora (mucho menor que los más de 100 registrados en las capas altas de la atmósfera), lo que hace suponer que en el desplazamiento de estos cantos ha debido intervenir algún tipo de fluido, posiblemente metano líquido.

En las imágenes tomadas durante el descenso se aprecian lo que parecen ser líneas de costa e islotes como los que se forman cerca de las playas. Los relieves montañosos más próximos muestran evidencias de deslizamientos en sus laderas, así como canales de drenaje y afluentes que descienden por la pendiente hasta alcanzar lo que parece ser un tranquilo y oscuro mar de hidrocarburos (Figura 24.12). Sin embargo, todavía es imposible definir si las áreas oscuras



que asemejan a lagos o mares contienen material líquido, semilíquido o sólo es el residuo carbonoso de fluidos existentes en el pasado. En cualquier caso, lo que parece definitivo es que, en algún momento de la historia reciente de Titán, grandes cantidades de hidrocarburos formaron masas líquidas estables en su superficie.

Días después del descenso de la sonda *Huygens*, su nave nodriza fotografió lo que parece ser un volcán de hielo de metano, una clara prueba de que Titán es un mundo geológicamente activo. Los datos registrados por la sonda han confirmado que el argón-40, que resulta de la desintegración radiactiva del potasio en el interior de los cuerpos planetarios, está presente en la atmósfera

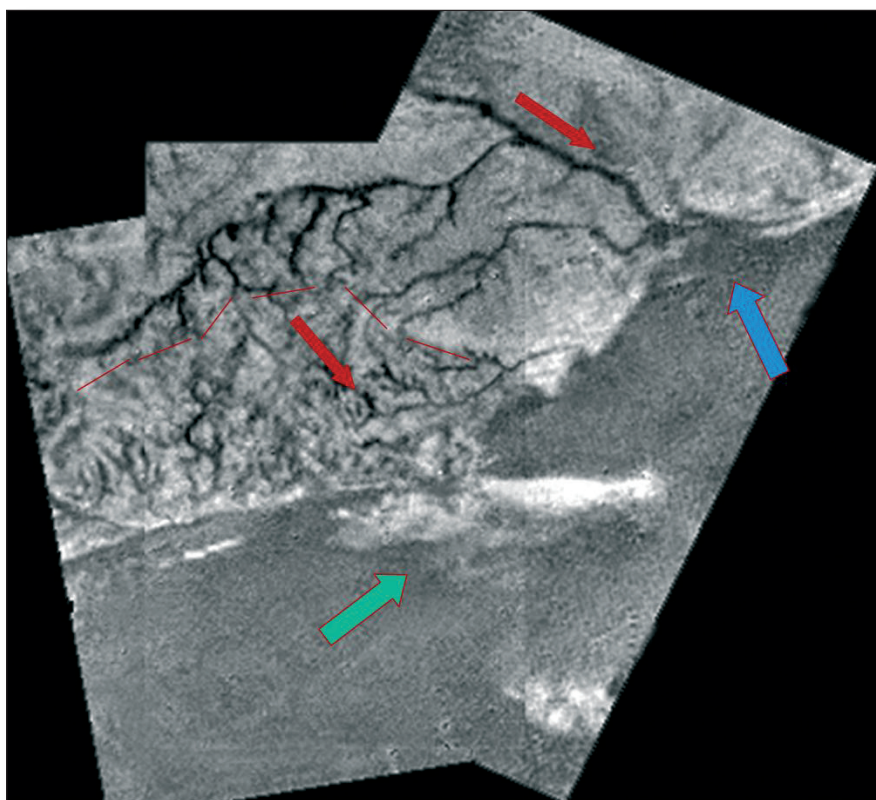


Figura 24.12. En esta imagen se aprecian dos redes de drenaje (ríos con afluentes) separados por un deslizamiento de ladera (ver línea roja). Las flechas rojas indican la dirección y sentido de desplazamiento de la corriente. La flecha azul señala el lugar donde desemboca el canal principal. En este punto, que parece formar parte de una línea de costa, se aprecia la acumulación de material oscuro, presumiblemente depósitos (sedimentos) arrastrados por la corriente principal. La flecha verde señala un relieve alargado y paralelo a la ladera, que podría tratarse tanto de una acumulación de materiales que se han deslizado por la pendiente, como de materiales depositados por una corriente en un antiguo mar de hidrocarburos (NASA/JPL/Space Science Institute).



de Titán, lo que refuerza la tesis de que el vulcanismo es aún hoy una realidad en la superficie de este satélite (Figura 24.13).

Los libros de citas célebres atribuyen al dramaturgo George Bernard Shaw una frase que bien podría resumir los resultados obtenidos hasta el momento por la nave *Cassini*. Decía Shaw que la ciencia siempre está en falta, «*pues nunca soluciona un problema sin crear otros diez*». Una inspirada apreciación hoy corroborada por un pequeño artefacto que navega entre las lunas de Saturno.

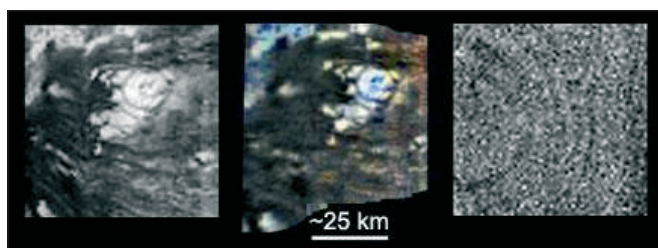


Figura 24.13. Tres detalles (en diferentes longitudes de onda) de una estructura circular que, en opinión de los especialistas, puede ser un volcán de hielo. Titán, la mayor luna de Saturno, es el único satélite del Sistema Solar que cuenta con una atmósfera densa, compuesta fundamentalmente por nitrógeno y metano. La ausencia de grandes cuencas de impacto, el descubrimiento de redes de drenaje complejas, así como la existencia de edificios volcánicos, hacen suponer que el origen y estabilidad de esta atmósfera está relacionada con la intensa actividad geológica del satélite (NASA/JPL/Space Science Institute).

## 25. TODO LO EXÓTICO

En el verano de 1989 se cumplió un sueño. La nave *Voyager 2* se convirtió entonces en el primer artefacto humano que lograba visitar los cuatro planetas gaseosos del Sistema Solar. Su travesía por el espacio, una proeza científica y tecnológica sin precedentes, fusionaba el romanticismo de los grandes viajes con la incertidumbre propia de la frontera inexplorada. La perspectiva histórica nos permite afirmar hoy que de todos los mundos que aquella nave alcanzó en su viaje, dos lunas destacan por su exótica belleza: Miranda y Tritón.

Descubierta el 16 de febrero de 1948 por el astrónomo Gerard Peter Kuiper, la pequeña luna Miranda debe su nombre a la heroína que William Shakespeare immortalizara en *La Tempestad*. La detección de este mundo orbitando alrededor de Urano, apenas un perceptible punto de magnitud 16,3 situado a tres mil millones de kilómetros de la Tierra, fue considerado entonces como uno de los más importantes logros de la astronomía planetaria del siglo XX. Mas aquel triunfo fue efímero, pues apenas un año después Kuiper los eclipsó con el descubrimiento de Nereida, un nuevo satélite en el sistema de Neptuno.

Pero el tiempo se encargó de poner las cosas en su sitio, y el 24 de enero de 1986, tras 8 años y medio de viaje y 38 de impaciente espera, la sonda planetaria *Voyager 2* captó las primeras imágenes del sistema de Urano. Tres días después, el por entonces director científico de la misión, Edward C. Stone, declaraba en rueda de prensa: «*estamos felizmente perplejos*». Los científicos acababan de descubrir la más tortuosa y sorprendente superficie planetaria de cuantas habían sido exploradas hasta la fecha; nunca nadie imaginó encontrar algo como Miranda en el Sistema Solar.

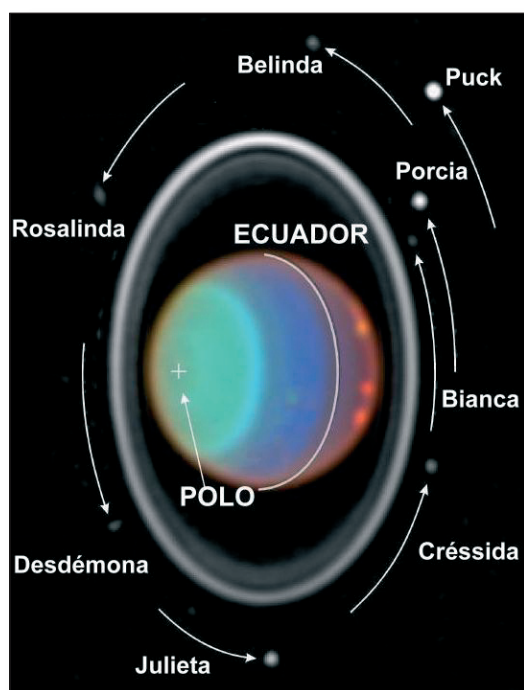
### MIRANDA

La *Voyager 2* descubrió 10 nuevos satélites y una interesante perspectiva de un planeta donde los acontecimientos más catastróficos pueden haber tenido lugar, pues tanto el eje de rotación de Urano como la trayectoria de traslación

de su séquito de lunas se encuentran inclinados  $98^\circ$ , es decir, están literalmente tumbados sobre el plano de la eclíptica (Figura 25.1). Las cámaras de la nave sólo pudieron captar imágenes de una parte del hemisferio sur de Miranda, por lo que apenas conocemos el 40% de un satélite que todos los especialistas coinciden en calificar como una especie de mezclanza de tres tipos de terreno diferentes: coronas, fracturas y áreas craterizadas (Figura 25.2).

Las coronas de Miranda son complejas estructuras que no tienen nada que ver con las coronas de Venus, con las que sólo comparten el nombre. Más que construcciones volcánicas parecen formas puramente tectónicas, con bordes paralelos intensamente comprimidos que envuelven total o parcialmente a una zona central. Sólo se conocen tres: Arden, Inverness y Elsinore, y cada una presenta un albedo, forma y dimensiones que le son característicos. Inverness tiene forma de galón (^), Elsinore parece rectangular y mide 50 kilómetros de lado, mientras que Arden es irregular y tiene un diámetro de 300 kilómetros. Las tres se caracterizan por tener pocos cráteres en su interior, presentar un bandeoado concéntrico y estar asociadas a grandes deformaciones (Figuras 25.3).

Desconocemos si Miranda cuenta con estructuras de impacto de grandes dimensiones. El terreno que rodea a las coronas muestra evidencias de una intensa craterización, una clara prueba de que estas estructuras son más modernas que el entorno geográfico en el que se encuentran. En las imágenes también se



*Figura 25.1. Sin duda la característica más peculiar de Urano es que su eje de rotación está inclinado  $98^\circ$  respecto a la vertical. Esto quiere decir que el planeta gira tumbado, estando sus polos y su ecuador alternativamente orientados hacia el Sol a medida que recorre su órbita. Sus lunas (quince, de las cuales sólo hay imágenes detalladas de las cinco mayores) giran en torno al ecuador del planeta, casi perpendicularmente al plano de la eclíptica (Hubble Space Telescope/NASA).*

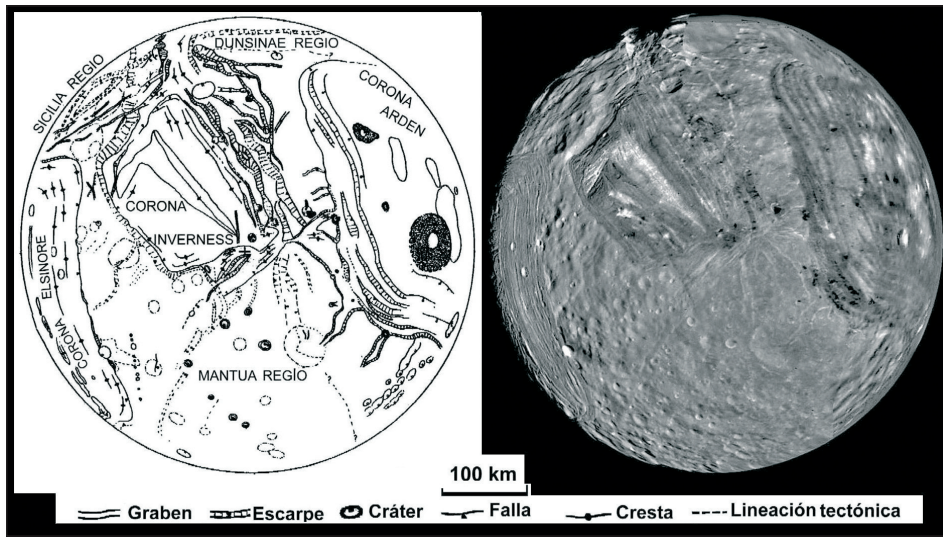
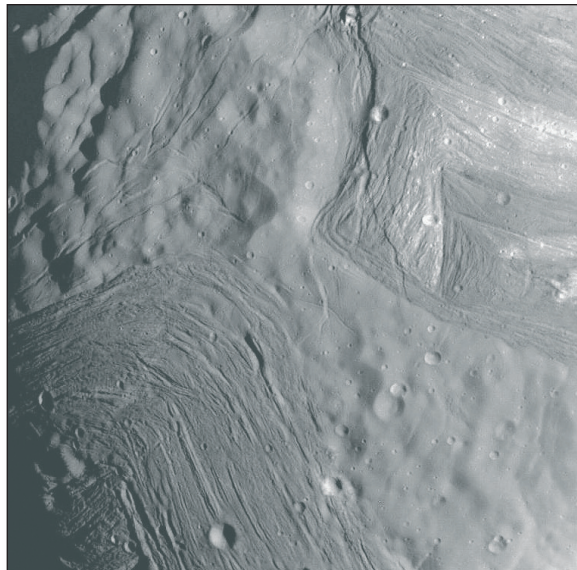
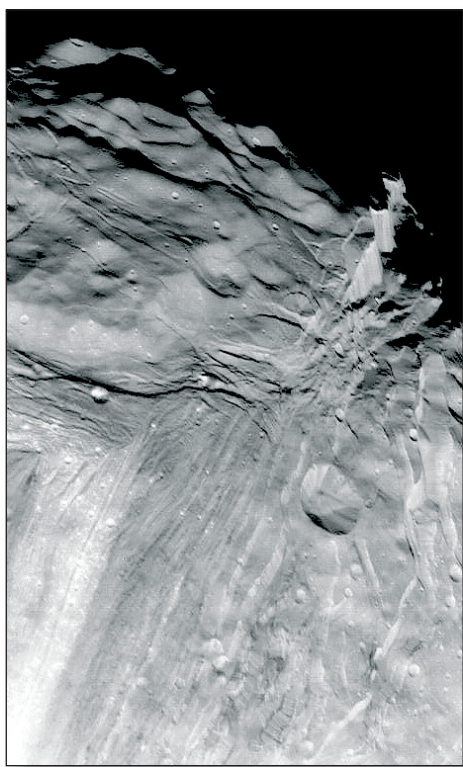


Figura 25.2. Mapa y vista general del hemisferio sur de Miranda. La nave Voyager 2 sólo pudo fotografiar esta parte del satélite. Su superficie muestra tres áreas muy diferentes a cualquier otro tipo de terreno observado en cualquier planeta o satélite: las coronas. El resto de la superficie visible, cubierta de cráteres degradados, es mucho más antigua. Los contrastes entre los diferentes tipos de terreno han llevado a sugerir que quizá Miranda fuera despedazada por un gran impacto y luego reconstruida por acción de la gravedad (NASA/JPL).

Figura 25.3. La corona Inverness (superior derecha) es fácilmente reconocible por su forma de galón -  $\Lambda$  -. Se trata de una depresión constituida por materiales con relieves y albedos alternantes, con los terrenos claros formando crestas de unos cientos de metros de altitud respecto de los oscuros, y el conjunto plegado en un ángulo muy agudo. En la parte inferior izquierda se localiza la corona Elsinore, una elevación de albedo uniforme de contorno redondeado y crestas de escaso relieve. Entre ambas, Elsinore, que presenta menos cráteres de impacto, debe de ser la más joven de las dos (NASA/JPL).





*Figura 25.4. Miranda está surcada por un espectacular conjunto de cañones que rodean a la corona Inverness. Cerca del borde superior de la imagen se distingue la pared del mayor precipicio conocido del Sistema Solar: Old 340° (antes conocido como Escarpe Verona), con una caída de 11 kilómetros (NASA/JPL).*

aprecia que los cráteres presentan dos estados de conservación muy distintos: o están prácticamente desmantelados, o parecen muy recientes.

El tercero de los rasgos importantes de Miranda son las fracturas. Todas se caracterizan por afectar exclusivamente al terreno antiguo y chocar perpendicularmente contra las coronas. Además, cabe subrayar que las fallas son la mejor prueba de que en el satélite han actuado esfuerzos de gran magnitud, siendo el mejor de los ejemplos el escarpe Old 340° (antes conocido como Escarpe Verona) que, con una caída en picado de 11 kilómetros, es probablemente la mayor escarpa de falla del Sistema Solar (Figura 25.4).

¿Cómo se explica que una luna de tan sólo 480 kilómetros de diámetro presente tantas deformaciones? El hecho de que los satélites próximos a planetas gigantes hayan sufrido impactos mucho mayores que las lunas más lejanas (debido a que el planeta atrae cometas y asteroides hacia sí mismos), llevó al equipo de *Voyager 2* a proponer el modelo más atractivo y popular de todos: el satélite pudo ser destruido por completo debido a un gran impacto. Los escombros de la colisión (tanto del impactor como del satélite), tras chocar lentamente entre sí, se soldaron nuevamente en el espacio, sin llegar a fundirse pero deformándose. El resultado sería Miranda, un satélite hecho de parches e inacabado, literalmente un gran puzzle espacial. Este modelo vendría respaldado



por el hecho de que el sistema de Urano parece haber sido víctima de colisiones gigantescas, alguna quizá incluso responsable de haber desplazado el eje de rotación del planeta hasta su posición actual. Otras líneas de investigación apuntan a las resonancias orbitales como posibles responsables de las coronas y fracturas. Se ha calculado que Miranda pudo estar sometida a unas intensas resonancias con sus compañeros Umbriel (resonancia 3:1) y Ariel (resonancia 5:3). La fricción generada por intensos efectos de marea pudo llegar a fracturar y fundir parcialmente buena parte del satélite, generando intensas corrientes de convección de las que las coronas serían sólo el reflejo exterior.

Ambas hipótesis presentan serias lagunas. Si los elipsoides son corrientes convectivas de un cuerpo, ¿por qué aparecen divididos en bandas de diferentes albedos, y por qué al menos uno de ellos tiene una geometría angular, tan diferente de una corriente de flujo? Por otra parte, si el satélite realmente se rompió, ¿por qué lo hizo en fragmentos tan grandes y elipsoidales? Y por último, si aceptamos que tanto los impactos como las resonancias son fenómenos bastante frecuentes, ¿por qué no hay más cuerpos como Miranda en el Sistema Solar?

La posibilidad de reconstrucción de satélites es una idea completamente nueva que ha sido forzada por este pequeño mundo de hielo. Cuando un periodista preguntó a los científicos del *Jet Propulsion Laboratory* acerca de por qué seguían tan desconcertados al cabo de varios días de recibir las primeras fotos de Miranda, uno de ellos respondió: *«si uno comprende algo la primera vez que lo ve, lo más probable es que ya lo supiese. De manera que, en cierto sentido, cuanto más perplejos estamos, más exitosa ha sido la misión.»*

Afortunadamente, aún nos queda por explorar el 70 % del sistema de Urano y más de la mitad de Miranda... Y ante la extraña belleza de lo hasta ahora descubierto, uno no puede por menos que soñar con las sorpresas que nos deparará esta excitante aventura.

## TRITÓN

Cuenta la mitología que Tritón nació de la pasión entre Poseidón y la sirena Anfítrite. Hoy llamamos así al mayor de los satélites de Neptuno, descubierto por William Lassell la noche del 10 de octubre de 1846. Durante más de 140 años poco se pudo averiguar acerca de un tenue punto de luz sólo perceptible a través del ocular de un potente telescopio. Los viejos manuales de astronomía recogen dos peculiaridades acerca de Tritón: primero, que cuenta con una inclinada órbita retrógrada alrededor de Neptuno, es decir, gira en sentido contrario a la mayoría de los satélites del Sistema Solar; y segundo, que a partir de los primeros análisis espectrales realizados en 1979 se podía deducir que se trataba de un mundo cubierto por hielo de metano. Cualquier posible duda al respecto se disipó en la madrugada del 24 de agosto de 1989, cuando

la nave *Voyager 2* envió las primeras imágenes del satélite y los científicos de la misión descubrieron, en palabras de quienes esa noche montaban guardia en la sala de control de la misión: «*un mundo sin par*» (Figura 25.5).

En su superficie hay pocos cráteres de impacto, pero los que encontramos se caracterizan por su pequeño tamaño y presentar un excelente estado de conservación. El mayor de todos, Mazomba sólo tiene 27 kilómetros de diámetro. La ausencia de terrenos craterizados antiguos nos sugiere una larga e interesante historia geológica capaz de borrar las huellas dejadas por los impactos (Figura 25.6 y 25.7). Las peculiaridades de su órbita: inclinada y retrógrada, nos sugieren que probablemente la energía responsable de este rejuvenecimiento haya sido de origen mareal, pues existe cierto consenso en aceptar que Tritón es un satélite capturado por Neptuno. Sin embargo, el hecho de que la superficie sea tan reciente (se estima una edad inferior a 300 millones de años) en comparación con la edad estimada para el proceso de captura, datado en unos 1.000 millones de años, nos sugiere que esta luna debe disponer de alguna otra fuente de energía interna. Su densidad, estimada en  $2,07 \text{ g/cm}^3$ , evidencia que debe contener una cantidad apreciable de roca y, presumiblemente, de isótopos radiactivos.

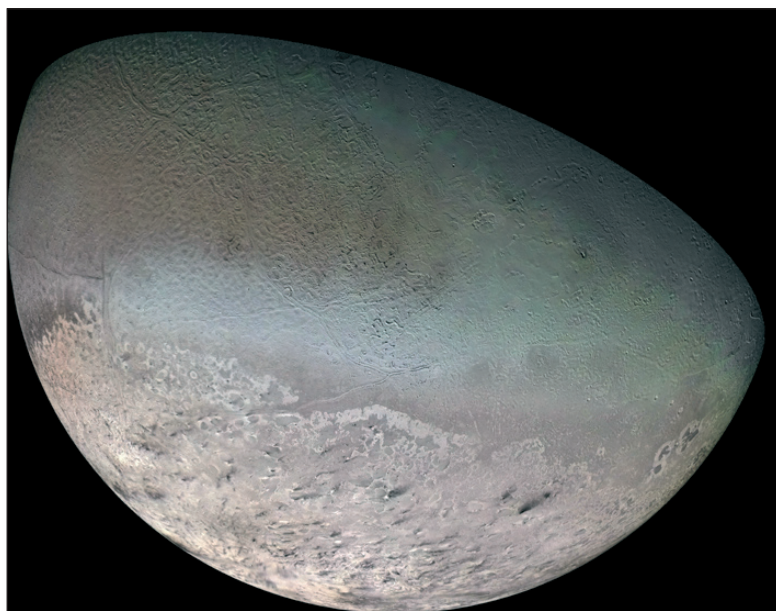
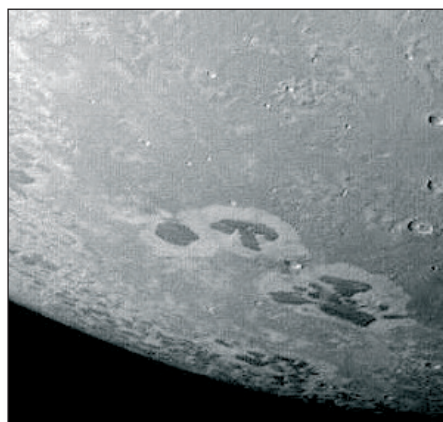


Figura 25.5. Con un diámetro de 2.700 km, Tritón es el mayor satélite de Neptuno y el séptimo del Sistema Solar. Está rodeado por una tenue atmósfera de nitrógeno (su presión atmosférica es una cienmilésima de la terrestre; aun así, es suficiente para provocar un ligero vientecillo). Su superficie es la más fría medida hasta ahora en el Sistema Solar:  $-235^\circ\text{C}$  (NASA/JPL).



*Figura 25.6. Ruach Planitia es una depresión circular de 250 km de diámetro en cuyo interior se localizan dos cráteres de impacto: Dilolo al norte y Amarun al sur. El origen de Ruach Planitia es objeto de debate: para unos investigadores se trataría de una antigua cuenca de impacto alterada por la fusión del hielo, otros la interpretan como un antiguo lago de nitrógeno. Pero existe una tercera posibilidad, una hipótesis híbrida: podría ser una antigua estructura de impacto que hubiese funcionado como un lago durante mucho tiempo. La morfología típica de un cráter se habría ido borrando debido a la acción del nitrógeno líquido y al calor interno del satélite (NASA/JPL).*

*Figura 25.7. Las tres manchas oscuras con aureola brillante que se observan en la parte inferior de la imagen han sido interpretadas por los especialistas como lagos de nitrógeno helado. Las bajas temperaturas permiten que el nitrógeno sea estable en superficie tanto en estado líquido como sólido. Los lagos podrían estar situados sobre una zona de fractura, y su temperatura controlada por la energía interna del satélite (NASA/JPL).*



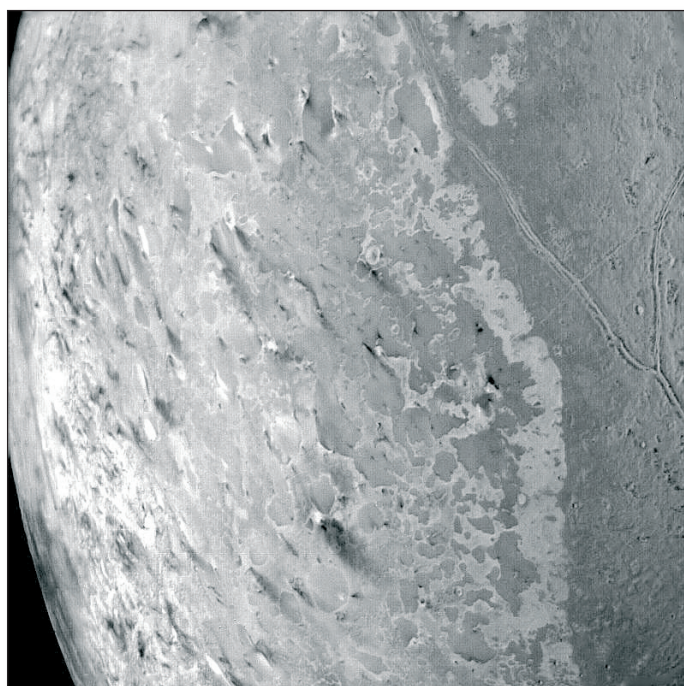


Uno de los rasgos morfológicos más peculiares de Tritón es el conocido como terreno *cantaloupe*, llamado así por parecerse a la piel de una cierta clase de melón, el cantalupo. Este tipo de superficie presenta rugosidades, depresiones, fallas y estructuras circulares de hasta 30 kilómetros de diámetro (Figura 25.8). Aunque su origen es todo un misterio, la propuesta más aceptada es que se formó por el ascenso y redistribución de material de baja densidad que originalmente se encontraba a varias decenas de kilómetros de profundidad.

Algunas zonas de la superficie aparecen teñidas de colores rosáceos que han sido interpretados como sedimentos de hielo mezclados con compuestos de carbono y materiales orgánicos complejos. El mecanismo de formación más aceptado es la irradiación del metano y el nitrógeno por parte de rayos ultravioletas solares y electrones procedentes del campo magnético de Neptuno. En el ámbito de la química orgánica es bien conocida la capacidad de los rayos ultravioleta para formar polímeros carbonosos (de color oscuro, como en los



*Figura 25.8. Terreno cantaloupe. Este tipo de superficie planetaria es hasta el momento un endemismo propio de algunas regiones del Hemisferio Norte de Tritón. Se caracteriza por presentar una disposición regular de depresiones circulares que en algunos casos recuerdan a cráteres de impacto muy alterados (NASA/JPL).*



*Figura 25.9. Las manchas alargadas y oscuras que se aprecian en esta imagen se interpretan como depósitos dejados por penachos criovolcánicos, es decir, géiseres de nitrógeno y metano que inyectan partículas oscuras, presumiblemente compuestos de carbono, en la tenue atmósfera de Titán. En esta región del hemisferio sur se han contabilizado más de 50 estructuras de este tipo, algunas con tamaños superiores a los 250 km de longitud (NASA/JPL).*

núcleos cometarios) a partir de compuestos más sencillos. Algunos investigadores piensan que estas regiones de la superficie están relacionadas con depósitos acumulados estacionalmente, dado que, por la inclinación de su eje de rotación, Tritón «disfruta» de estaciones de unos 80 años de duración. El ciclo estacional se iniciaría con la acumulación de hielo *limpio* durante el invierno. Con el paso del tiempo, estos materiales acabarían por transformarse en sedimentos oscuros en primavera. Se evaporarían los hielos y serían transportados por la atmósfera del satélite hacia el hemisferio invernal durante el verano, y una vez allí cubrirían otra vez la superficie. Los compuestos de carbono no se evaporarían, por lo que se irían acumulando y aumentaría su espesor temporada tras temporada. Un incremento de la temperatura, bien por calor interno, bien con un incremento estacional de la insolación, podría calentar los sedimentos más volátiles. Con el tiempo éstos se sublimarían y saldrían disparados en surtidores análogos a los géiseres terrestres (Figura 25.9), arrastrando en el proceso hielo y sedimento, materiales que pasarían a formar parte de una tenue atmósfera de  $10^{-5}$  atmósferas de presión y 173 grados bajo cero de temperatura.



Si admitimos que Tritón es un satélite capturado por Neptuno, debemos de estar preparados para la pregunta más interesante de todas: ¿de dónde vino? La mayoría de los especialistas creen que posiblemente provenga del cinturón de Edgeworth-Kuiper. Se estima que en esta parte del Sistema Solar podrían existir hasta 70.000 objetos con tamaños superiores a los 100 kilómetros, muchos mayores incluso que Plutón (ver capítulo 28). Así pues, Tritón sería la evidencia de que en esta región pueden existir lugares fascinantes aún por descubrir, algunos, quizá, geológicamente activos. No deja de ser paradójico el hecho de que uno de los mundos más fríos que conocemos, pueda tener cierto interés astrobiológico, pues en él se dan condiciones interesantes para la vida: energía (mareal o radiactiva) que permite la presencia de líquidos (criovulcanismo), y, en el que se forman moléculas complejas de naturaleza carbonosa.

Durante mucho tiempo se pensó que el futuro de Tritón era poco alentador. Sigue una órbita inestable que le acerca lentamente a Neptuno. Los cálculos teóricos originales sugerían que dentro de unos 100 millones de años cruzaría el temido Límite de Roche, el punto a partir del cual un satélite tiende a disgregarse por efecto de la atracción gravitatoria de un planeta. En estas circunstancias, lo más probable era que terminase sus días convertido en un vistoso anillo alrededor de Neptuno. Cálculos posteriores más refinados han demostrado que la velocidad a la que Tritón se acerca a Neptuno es muy lenta, y que no cruzará el Límite de Roche antes de 9.000 millones de años, mucho después de que el Sol haya terminado su ciclo principal de vida.

Los exploradores de mundos sospechan que tanto Miranda como Tritón deben su exotismo a algún tipo de proceso de corte catastrofista, quizá incluso hayan estado al borde de la destrucción. Colisiones y resonancias pueden condicionar tanto la evolución como la existencia en sí misma de un cuerpo planetario. Miranda y Tritón tuvieron suerte, pero quién sabe cuántos mundos sin par han desaparecido así... y cuántos nos quedan aún por descubrir.

## V. EPÍTOME

*«Tiene la razón humana dos rasgos característicos y correlativos: son su tendencia a generalizar, por una parte, y a limitar por otra. Unas veces queremos que el principio explicativo que acabamos de encontrar abarque y comprenda todos los planos de la realidad; otras veces queremos limitar la esfera de lo real al conjunto de problemas resueltos por nuestro principio: la tendencia a generalizar nos hace pensar que la fórmula recién descubierta agota los fenómenos todos y, en justa correlación, la tendencia a limitar nos hace creer que se acaban los problemas cuando nuestro principio ha dado ya su máxima extensión explicativa. Estas dos tendencias no son, en realidad, otra cosa que los síntomas delatores del cansancio de un intelecto. Son tendencias quietistas y, por tanto, absolutistas. El investigador que, en ruda lucha espiritual, ha logrado forjar un nuevo concepto y cree haber encontrado en él la solución de los problemas todos, ya no es un hombre de investigación. Habiendo resuelto un problema, huyó de su espíritu la ironía, la duda fecunda; cesó de situarse en la periferia científica como un explorador».*

**Manuel García Morente**  
La Universidad, 1914



## 26. EVOLUCIÓN

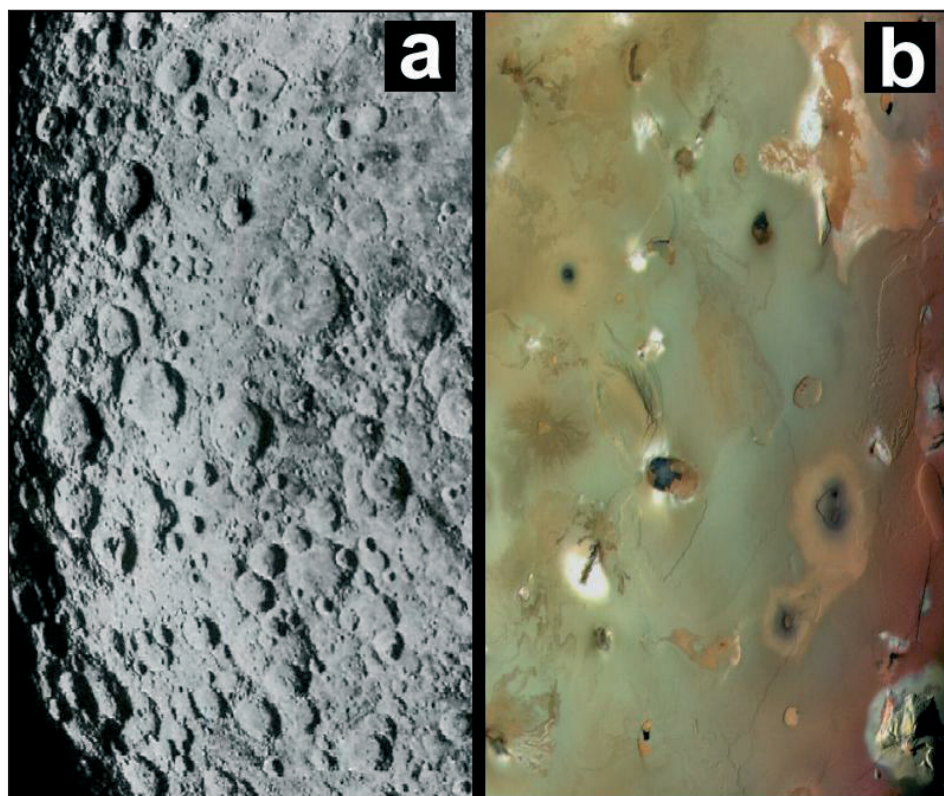
La búsqueda de unos principios generales que nos ayuden a comprender la evolución geológica de los cuerpos planetarios es una tentación a la que resulta difícil resistirse. La experiencia acumulada en estas últimas décadas nos animan a ser precavidos con esta ambición científica, pues si algo hemos aprendido es que cada cuerpo presenta unas características que lo hacen único e incomparable. No hay dos mundos iguales.

Al contemplar un paisaje de otro mundo sucede lo mismo que cuando miramos a las estrellas: viajamos hacia atrás en el tiempo. Las formas que observamos nos cuentan historias sobre los procesos y las energías que lo hicieron posible. Afortunadamente el ser humano dispone de una herramienta capaz de remontar el tiempo, la Geología. Con su ayuda hemos podido clasificar las cortezas planetarias en tres grupos: primordial o craterizada, secundaria o volcánica, y terciaria o reelaborada. Esta división, fruto de los datos y descubrimientos acumulados durante más de tres décadas de exploración, es una pieza clave para comprender la evolución del motor interno y la superficie de cualquier cuerpo sólido de nuestra vecindad cósmica.

### **TRES CORTEZAS, TRES HISTORIAS**

La corteza primaria se formó hace más de 4.000 millones de años como fruto de los bruscos episodios de fusión a gran escala que se producían cuando cuerpos de gran tamaño colisionaban contra los planetas recién formados por acreción. La energía cinética de los impactores se convertía en calor durante el choque y contribuía a mantener a altas temperaturas las superficies planetarias. Se estima que este proceso pudo liberar suficiente calor como para fundir la superficie de cualquier protoplaneta, generando con ello ingentes cantidades de lava que llegaron a formar auténticos océanos de magma de varias decenas de kilómetros de profundidad. Cuando la masa de roca fundida empezó a enfriarse, los cristales de algunos minerales se solidificaron antes que otros y se separaron de la fracción que aún permanecía líquida. Fue a través de este

proceso, conocido con el nombre de diferenciación magmática, como se formaron las cortezas primordiales de los cuerpos rocosos de mayor tamaño. El ejemplo mejor estudiado hasta el momento son las tierras altas de la Luna (las más blancas a simple vista), donde los granos poco densos de feldespato que forman las anortositas «flotaron» sobre aquel infernal océano (Figura 26.1).



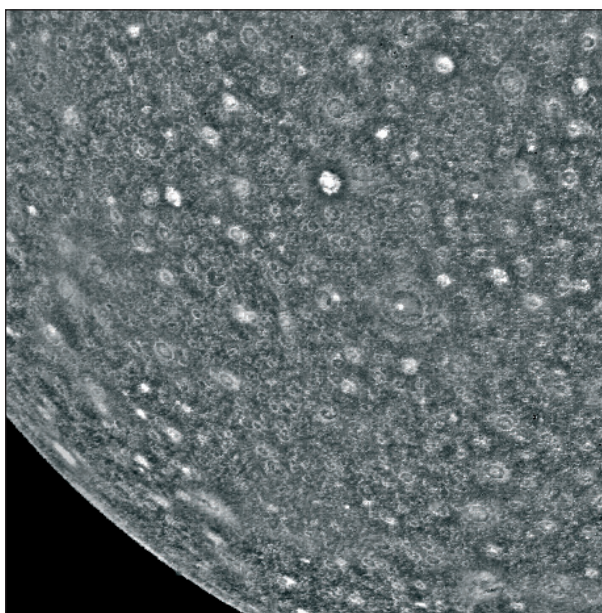
*Figura 26.1 . Las tierras altas de la Luna (a) y las llanuras volcánicas de Ío (b), dos ejemplos significativos de superficie primaria y secundaria respectivamente. (Fotocomposición con imágenes de JPL-NASA)*

Las cortezas de los satélites de roca y hielo también se formaron por enfriamiento, sin embargo, su aspecto debió ser completamente distinto al de los planetas rocosos: mundos oceánicos con grandes masas de hielo a la deriva que, conforme se fueran enfriando, actuarían como núcleos de acreción. Calisto, uno de los cuerpos con más cicatrices de impacto de todo el Sistema Solar, es quizá el mejor ejemplo (Figura 26.2).

La corteza secundaria se forma como consecuencia de la fusión de una pequeña fracción del interior de un planeta o satélite, lo que suele provocar la emisión al exterior de lavas basálticas o criovolcánicas. Los mares de la Luna son



*Figura 26.2. Superficie de Calisto. Este satélite galileano está considerado como el cuerpo más craterizado (¿menos evolucionado?) del Sistema Solar. (JPL/NASA)*



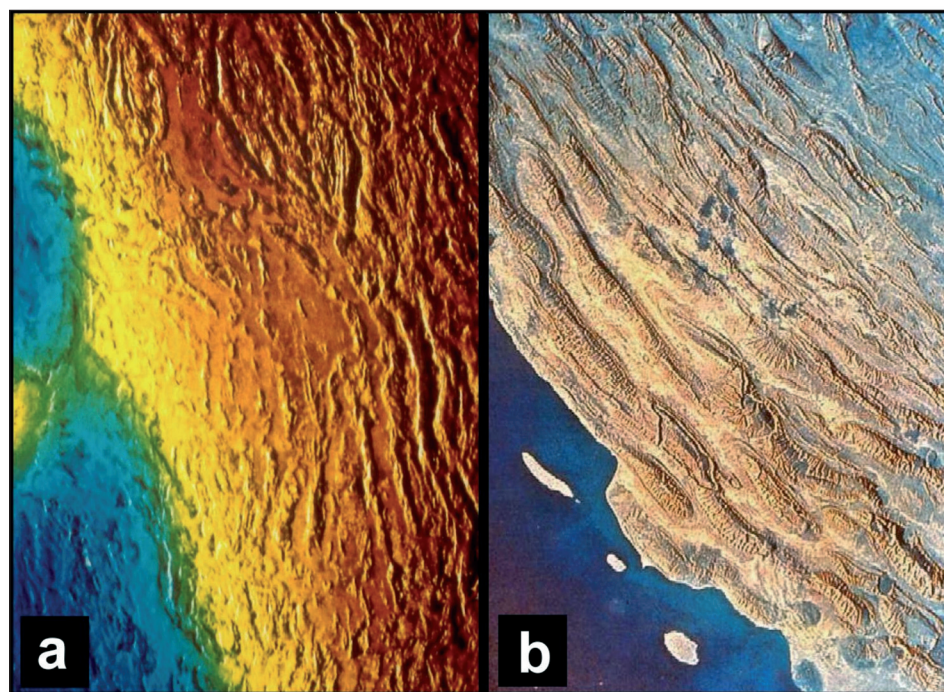
un buen ejemplo, pues se formaron por la acumulación de lavas basálticas (el basalto es un tipo de lava procedente de la primera fase de fusión -destilación- del manto de un planeta) que poco a poco fueron rellenando las profundas y extensas cavidades producidas como consecuencia de los últimos grandes impactos. Se cree que las planicies volcánicas del hemisferio Norte de Marte tienen un origen semejante pero, dado su emplazamiento continuo durante millones de años, deben representar la mayor parte de la gruesa corteza marciana. Otro ejemplo nos lo ofrece Venus, donde un episodio de vulcanismo masivo, datado en unos 300-700 millones de años, renovó la mayor parte de su superficie.

El suelo oceánico terrestre, aunque mucho más joven (menos de 200 millones de años) y delgado, es el ejemplo de corteza secundaria que mejor conocemos. En contraste con el engrosamiento vertical experimentado por la Luna, Marte y presumiblemente Venus, el fondo oceánico terrestre se mueve lateralmente y puede incluso regresar al interior mediante el proceso de subducción. Sin embargo, de todos los ejemplos descubiertos hasta el momento, quizá el caso más espectacular sea el de Ío que, impulsado por el calor que la fricción mareal periódicamente libera, es capaz de emitir suficiente cantidad de lava a través de edificios volcánicos y fisuras como para rejuvenecer toda su superficie en unos pocos cientos de años.

La corteza terciaria es la más escasa y exótica de todas, pues es el resultado de intensas transformaciones que durante cientos de millones de años

han experimentado los dos tipos anteriores, mediante procesos de erosión, sedimentación, crecimiento lateral, intrusiones magmáticas y deformaciones tectónicas. El ejemplo más representativo, quizá incluso el único ejemplo, lo encontramos en nuestro planeta. En opinión de algunos investigadores tanto los terrenos de tessera en Venus (los más antiguos y deformados del planeta), como algunas regiones de los satélites Europa, Tritón y Encélado, también podrían considerarse corteza terciaria (Figura 26.3). Su posible descubrimiento en Marte no supondrá ninguna sorpresa para la comunidad científica, máxime cuando desde hace casi una década se viene especulando sobre la posibilidad de que este planeta llegara o no a conocer algún episodio de tectónica de placas hace miles de millones de años.

¿Qué implicaciones tiene el descubrimiento de corteza terciaria en un cuerpo planetario? Básicamente una: viene a decirnos que su motor geológico ha permanecido encendido y activo durante mucho tiempo. Es decir, ha dispuesto de suficiente energía interna como para hacer evolucionar su aspecto desde el estado más sencillo o primordial hasta el más complejo (Figura 26.4). Y no debemos olvidar que los mundos geológicamente vivos, si además disponen



*Figura 26.3. Contacto entre Maxwell Montes y Fortuna Tessera en Venus (a) comparado con los Montes Zagros de la Tierra (b), dos posibles ejemplos de corteza terciaria. (Fotocomposición con imágenes NASA)*

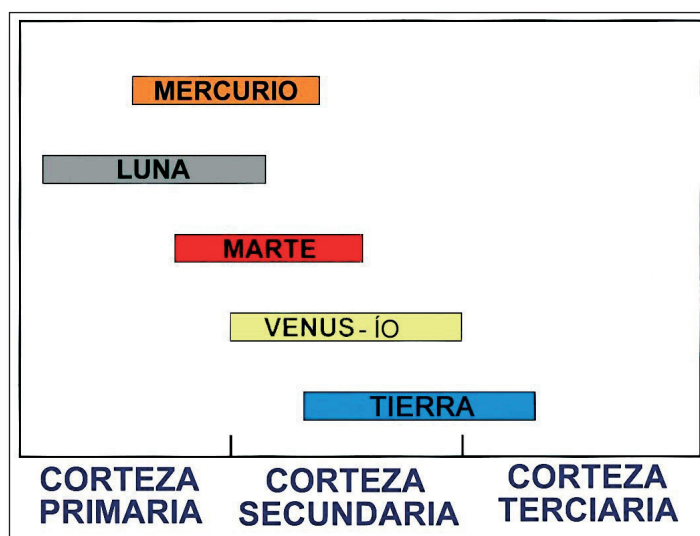
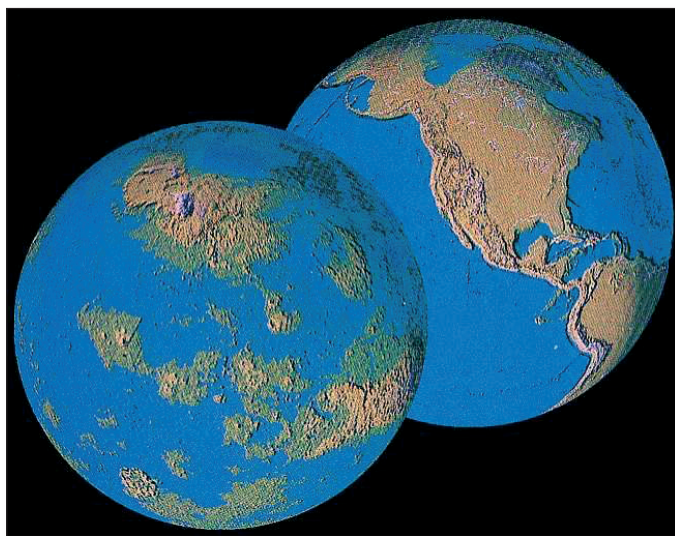


Figura 26.4. Gráfico de evolución cortical. ¿El tamaño de un cuerpo decide su historia? (Modificado de Head, 1999).

de agua, son firmes candidatos para albergar (o haber albergado) alguna forma de vida. La Astrobiología se vende bien.

## LA REGLA DEL RADIO

¿Por qué la Tierra es un planeta mucho más dinámico que Mercurio o Marte y tan distinto de Venus? ¿Cuál es, es definitiva, el factor que determina si un cuerpo planetario dispone de suficiente energía para evolucionar? Para intentar responder a estas preguntas el geólogo planetario James W. Head propuso a finales de los años setenta el llamado Índice de Evolución Planetaria (I.E.P), una relación numérica que permite establecer de forma aproximada el grado de actividad y evolución geológica de cualquier cuerpo. Su fundamento teórico es sencillo. A partir de la datación de rocas lunares se deduce que cuanto mayor número de cráteres de impacto presenta una región de nuestro satélite, más antigua es ésta. Esta relación cráteres-edad se puede extrapolar fuera de nuestro satélite debido a que el Gran Bombardeo Asteroidal que se produjo tras la acreción de los cuerpos planetarios, hace 3.900 millones de años, afectó a todas las superficies sólidas del Sistema Solar. Por otro lado, sabemos que los procesos geológicos que pueden borrar (cubrir o erosionar) los cráteres dependen de la cantidad de energía de la que disponga el planeta o satélite. Así pues, cuanto mayor sea la superficie planetaria craterizada, menor será la energía con la que el cuerpo habrá contado a lo largo de su historia y, por lo tanto, menor será su grado de evolución. Por el contrario, una superficie libre de cráteres



*Figura 26.5. Comparación de la Tierra y Venus. Ambos planetas tienen un tamaño parecido pero su evolución geológica ha sido muy distinta. (Fotocomposición con imágenes NASA).*

nos habla de una historia geológica más compleja, de una mayor cantidad de energía implicada en el proceso de rejuvenecimiento y, en definitiva, de un mayor grado de evolución.

El vulcanismo es uno de los procesos geológicos más comunes y puede cubrir las superficies craterizadas. También la erosión puede destruir los cráteres, pero este proceso no es tan general, pues sólo actúa en los cuerpos con atmósfera y no está relacionada con la energía interna tan claramente como el vulcanismo. En el caso de la Tierra la energía interna es responsable del vulcanismo, las deformaciones de la corteza (pliegues y fallas), la tectónica de placas e incluso la presencia y composición de nuestra atmósfera.

James Head estableció que el I.E.P. de un cuerpo se obtiene de dividir el porcentaje de terrenos volcánicos de un cuerpo entre el porcentaje de terrenos craterizados del mismo. Además, la ordenación de los planetas terrestres según su I.E.P. permite obtener una primera respuesta a las preguntas que nos planteábamos al comienzo del capítulo: los planetas son más activos y sus paisajes más complejos y diversos (es decir, más evolucionados), cuanto mayor es su masa. Según se deduce del I.E.P. el tamaño sí importa, pues los cuerpos con mucha masa almacenan una mayor energía, tanto por el proceso de acreción planetaria primordial como por la descomposición de los elementos radiactivos que contengan las rocas que lo constituyen. Esta idea se puede expresar de una forma más elegante a través de la conocida como *regla del radio*, según la cual, la energía de que dispone un planeta está en función de su tamaño, es decir, de su radio.



Para que en un cuerpo planetario persista la actividad geológica es necesario que éste cuente con una cierta cantidad de calor interno. La energía residual disponible en un momento cualquiera de su evolución ( $E_{rm}$ ) será el resultado de una resta:

$$E_{rm} = \text{Energía almacenada o producida} - \text{Energía radiada al espacio}$$

Para los planetas que producen su energía por radiactividad o como residuo de las colisiones iniciales, se cumple que la cantidad de energía almacenada o producida ( $E_p$ ) es proporcional al volumen del mismo, pues un planeta voluminoso implica gran cantidad de colisiones y un mayor volumen de rocas donde se encuentran dispersos los elementos radiactivos. Por esta razón, si suponemos que un planeta es una esfera perfecta, entonces se cumplirá que:

$$E_p = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 \cdot k_1$$

donde  $\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3$  es el volumen y  $K_1$  la tasa de producción de energía ( $W \cdot m^{-3}$ ). Y al contrario, la energía radiada ( $E_r$ ) al exterior es aproximadamente proporcional a la superficie de esa misma esfera:

$$E_r = 4 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot K_2$$

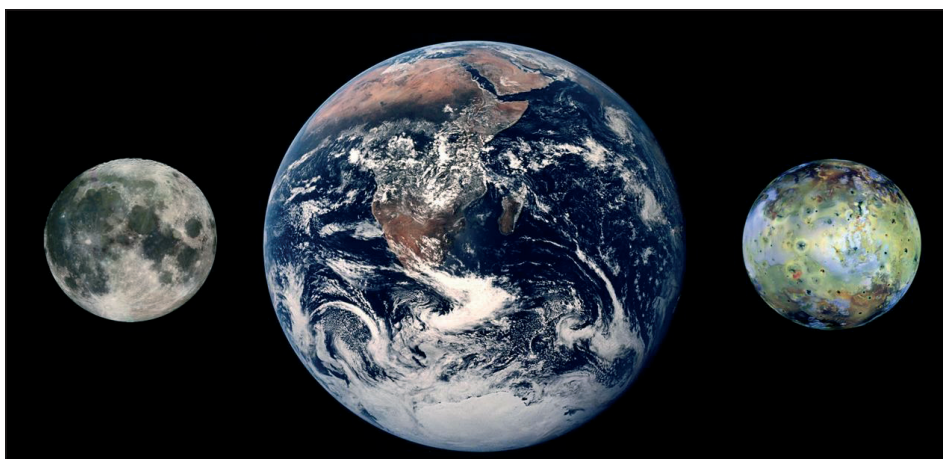
Donde  $4 \cdot \pi \cdot r^2$  es el área y  $K_2$  el flujo térmico, es decir, la energía que el cuerpo emite por metro cuadrado ( $W \cdot m^{-2}$ ) de superficie. Por lo tanto, el cociente de energía de un cuerpo ( $E_m$ ), se puede expresar de la siguiente forma:

$$E_m = \frac{E_p}{E_r} = K_3 \cdot r$$

Donde  $r$  es el radio del planeta y  $K_3$  un término que relaciona la energía producida con la energía emitida. Como vemos, el cociente de energía de un cuerpo ( $E_m$ ) es proporcional al radio ( $r$ ) del planeta, es decir, a su masa. Pero, además de la masa, también es muy importante tener en cuenta la densidad del cuerpo planetario. Una densidad media próxima a  $1 \text{ g/cm}^3$ , como la de Encélado, nos habla de un interior constituido por agua, mientras que una densidad de  $5 \text{ g/cm}^3$  nos indica la presencia de silicatos, y por lo tanto de una mayor cantidad de elementos radiactivos.

A pesar de lo sugerente que pueda resultar esta idea globalizadora, la regla del radio presenta una importante excepción que la hace tambalearse: más





*Figura 26.6. Ío tiene un tamaño semejante al de la Luna, a pesar de lo cual cuenta con la superficie más joven del Sistema Solar. ¿Podemos afirmar que este satélite es el cuerpo más evolucionado de todos? (JPL/NASA).*

allá del cinturón de asteroides no sirve. Los satélites de los planetas gaseosos que cuentan (o han contado) con energía mareal en algún momento de su historia no la cumplen. Quizá el ejemplo más emblemático sea Ío, que con un tamaño comparable al de la Luna es, sin embargo, el cuerpo que presenta un mayor I.E.P. del Sistema Solar (ver tabla). Si el Proyecto Apolo buscó en nuestro satélite las llamadas rocas del Génesis, en Ío encontraríamos la superficie planetaria más joven con un índice de evolución que tiende a infinito. Y este no es el único caso. Su vecina Europa y el lejano Tritón también muestran superficies bastante jóvenes. Pero si hay un cuerpo que se salga de toda norma, ese es Encélado. A pesar de su pequeño tamaño y su baja densidad, muestra espectaculares evidencias de actividad volcánica sin estar sometida a fuertes mareas. Este mundo no encaja en ninguno de nuestros modelos.

El I.E.P. cuenta además con otro problema, esta vez de corte básicamente filosófico. ¿Estamos dispuestos a aceptar que Ío es el cuerpo más evolucionado de todo el Sistema Solar? La respuesta es un *No* rotundo pues, además del porcentaje de terreno no craterizado, debemos tener en cuenta la variedad de procesos y energías que intervienen en ese rejuvenecimiento (Figura 26.6).

De todo lo expuesto hasta ahora podemos extraer tres conclusiones. Primero: no podemos predecir la geología de un cuerpo planetario basándonos únicamente en su masa o en su radio. Segundo: idénticos procesos en cuerpos de tamaño y composición semejante no desembocan necesariamente en los mismos resultados ni tienen su origen en las mismas fuentes de energía (recordemos que ésta puede ser de tres tipos: radiactiva, mareal o por impactos). De esto se deduce que las formas que observamos en la superficie de planetas y satélites

son el resultado de la interacción de numerosos procesos y fenómenos a lo largo del tiempo. Y tercero: somos muy afortunados pues, gracias al elevado número de factores que influyen en la evolución de un planeta, podemos encontrar en el espacio una fuente inagotable de sugerentes desafíos para la razón.

CUERPO	RADIO (Km)	DENSIDAD ( g/cm <sup>3</sup> )	MASA (g)	I.E.P. (aprox.)
MERCURIO	2.440	5,4	$3,3 \cdot 10^{26}$	0,3
VENUS	6.052	5,2	$4,8 \cdot 10^{27}$	4
TIERRA	6.378	5,5	$5,9 \cdot 10^{27}$	6
LUNA	1.738	3,3	$7,3 \cdot 10^{24}$	0,2
MARTE	3.396	3,9	$6,4 \cdot 10^{26}$	0,5
IO	1.820	3,5	$8,9 \cdot 10^{25}$	Infto.
EUROPA	1.565	2,9	$4,8 \cdot 10^{25}$	19
ENCÉLADO	250	1, 2	$6,5 \cdot 10^{22}$	1
MIRANDA	235	1,2	$6,5 \cdot 10^{22}$	0,5
TRITÓN	1.350	2,0	$2,1 \cdot 10^{25}$	19



## 27. GEO DIVERSIDAD

Planetas y satélites muestran una gran variedad de formas y paisajes que son un fiel reflejo de las complejas interacciones que mantienen la materia que los constituye y la energía que los alimenta. Sin embargo, no sabemos si esta diversidad geológica responde en realidad a una disparidad en las condiciones iniciales del sistema o, por el contrario, tiene su origen en divergencias evolutivas controladas por el azar. En opinión de algunos especialistas, para dar respuesta a esta pregunta necesitamos realizar un análisis histórico de cada cuerpo, una complicada labor sólo al alcance de disciplinas de corte historicista como la Biología y la Geología.

Los cuerpos planetarios cambian de aspecto y modifican su dinámica global con el paso del tiempo. En la mayoría de los casos su historia transcurre durante miles de millones de años sin grandes sobresaltos, protagonizando una monótona biografía controlada por el implacable proceso de enfriamiento y algún que otro evento catastrófico, generalmente impactos asteroidales o episodios de gran vulcanismo. Durante mucho tiempo se creyó que esta historia dependía, en último término, de la cantidad de energía que un cuerpo era capaz de almacenar en su interior. El razonamiento era impecable: cuanto mayor es un cuerpo planetario, más impactos fueron necesarios para lograr su acreción y, presumiblemente, más cantidad de elementos radiactivos puede almacenar en su interior. A mayor reserva de «combustible», más potente puede ser su motor interno y, previsiblemente, más tiempo puede durar su actividad geológica, sobre todo el vulcanismo. Por ser el más grande de los planetas rocosos, la Tierra podía ser entonces considerada como el último eslabón de una larga cadena evolutiva planetaria (Figura 27.1). Todo parecía encajar en este escenario asombrosamente simple y familiar, sospechosamente geocentrista. Pero los augures que a finales del pasado siglo XX confiaron en este determinismo evolutivo fracasaron. Las misiones *Voyager* y *Galileo* mostraron que los satélites de hielo son cuerpos diversos y singulares al margen de su tamaño. Para comprender el aspecto actual necesitamos desentrañar antes su pasado, su historia.

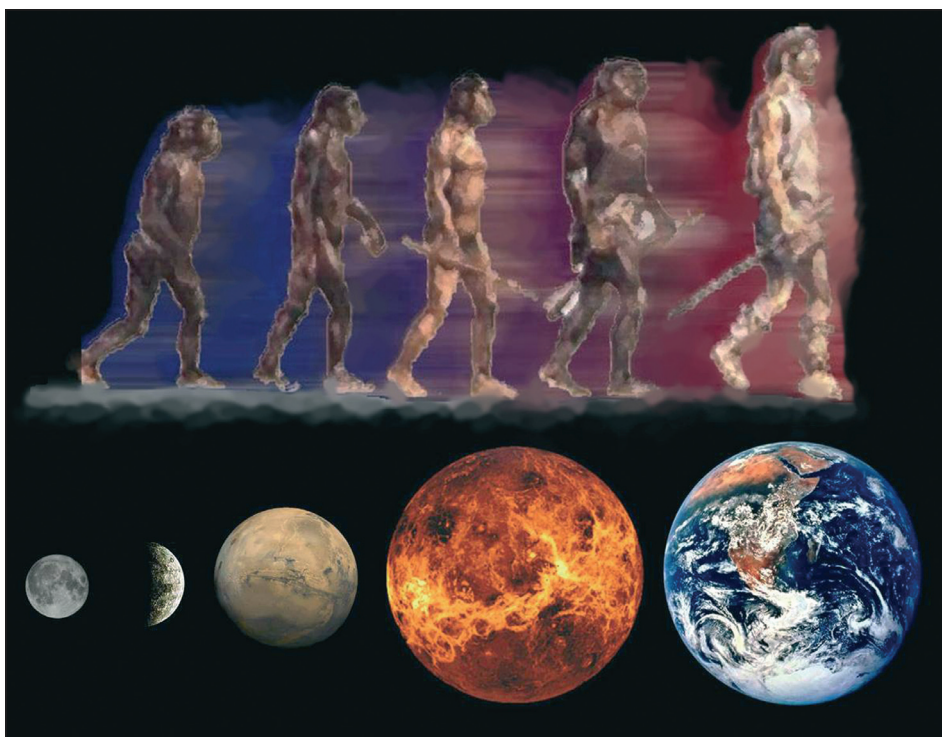
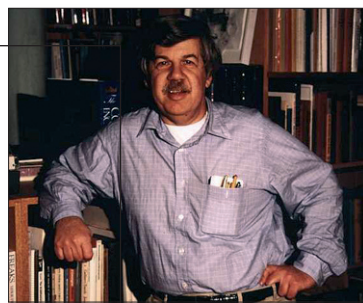


Figura 27.1. La Tierra como último eslabón de una larga y compleja cadena evolutiva. Este antropocéntrico modelo de evolución planetaria se basa exclusivamente en el tamaño, es decir, en la dotación inicial de combustible que, en teoría, permite mantener activa la maquinaria geológica de una luna o un planeta (Fotomontaje con imágenes de NASA/JPL).

La oleada de nuevos descubrimientos en contra de la llamada regla del tamaño (que tratamos en el capítulo anterior) llevó a Stephen Jay Gould, paleontólogo de la Universidad de Harvard especialista en evolución, a redactar un artículo en el que sin ningún rubor se atrevía a comparar los planetas con entidades biológicas (Figura 27.2). El razonamiento que expone en el sugerente ensayo *Planetas como Personas* es claro y directo: dado que los cuerpos planetarios y los organismos parecen poseer una individualidad irreductible que los hace únicos, ambos deben ser estudiados por ciencias de corte historicista, es decir, por aquellas disciplinas que se fundamentan en la reconstrucción de sucesos y que manejan sistemas complejos en continua evolución. Así pues, comprender el origen de la diversidad o las peculiaridades de un planeta (léase personalidad, si nos atrevemos a llevar la analogía de Gould hasta el extremo), sería como llegar a conocer íntimamente a una persona, para lo cual no es suficiente con saber dónde ha nacido, cuál es su altura o cuánto pesa. No podemos conformarnos con eso, hay que profundizar más. Debemos comportarnos como psicoana-



*Figura 27.2. Steve Jay Goul (1941-2002) fue profesor de la Universidad de Harvard. Paleontólogo especialista en evolución y divulgador científico, fue el primero en proponer que el estudio de los planetas debía abordarse mediante disciplinas de corte historicista, como si de entidades biológicas de trataran.*



listas<sup>1</sup> y descubrir aquellos acontecimientos, situaciones y experiencias que han definido su carácter. Los planetas serían como nosotros, todos parecidos, pero todos absolutamente distintos (Figura 27.3). En palabras de Gould: *«los planetas y las lunas no son un séquito repetitivo, formado bajo unas pocas leyes sencillas de la naturaleza. Son cuerpos individuales con historias complejas, y sus rasgos principales están producidos por acontecimientos únicos (en su mayor parte catastróficos) que modelan su superficie»*.

## DISPARIDAD INICIAL

Se estima que la temperatura del disco protoplanetario del que nacieron todos los cuerpos del Sistema Solar superó los 2.000 grados en las proximidades del centro, pero que pudo disminuir hasta 220 bajo cero (a tan sólo 53 grados por encima del cero absoluto) en la periferia. Primero se condensaron los compuestos refractarios, o sea, aquellos que son estables a mayor temperatura, según su abundancia relativa: aluminio, titanio, calcio, magnesio, silicio, hierro, y sodio. Los elementos que sólo se pueden condensar a bajas temperaturas, como el hidrógeno, el oxígeno, el carbono y el nitrógeno, lo hicieron en la parte exterior de la nebulosa. Por esta razón en la parte exterior del sistema predominan los mundos constituidos por compuestos volátiles en forma de hielo de agua, metano y amoníaco; mientras que en la zona interior del sistema encontramos cuerpos formados por distintos tipos de rocas. Este reparto diferencial (no equitativo) de elementos y compuestos en el disco protoplanetario, condicionó la dotación inicial de algunos cuerpos tanto en la cantidad de las llamadas sustancias anticongelantes como de los elementos radiactivos (uranio,

1. Si bien la idea original de comparar los planetas con las personas fue del paleontólogo y divulgador Steven Jay Gould, tanto la propuesta de «psicoanalizar» los cuerpos planetarios para llegar a conocer su personalidad (es decir, profundizar en aquellas características geológicas, físicas y químicas que los hacen únicos), como emplear el acertado término geodiversidad para referirse a la variedad de mundos y geologías que puede albergar el Cosmos, son fruto de la mente creativa de Concha López Llamas, amiga y maestra en el difícil campo de la didáctica.



*Figura 27.3. Geodiversidad. Las lunas y planetas que conforman el Sistema Solar no son un séquito repetitivo de objetos cuyo aspecto viene controlado por el tamaño. Todo lo contrario: son cuerpos individuales con historias complejas, cuya superficie ha sido modelada por acontecimientos únicos, en su mayor parte catastróficos (NASA/JPL).*

torio, aluminio, etc.), mucho más abundantes en la corteza de los mundos de roca que en los de hielo.

Cualquier sustancia química que se añade a un líquido para que su punto de solidificación o de fusión descienda, recibe el nombre de *anticongelante*. Los principales elementos y compuestos que actúan como anticongelantes a escala planetaria son básicamente cinco: el azufre, el carbono, el amoníaco, el agua y las sales. Puesto que tienen la propiedad de rebajar significativamente el punto de fusión tanto del hielo como de metales y silicatos (contribuyendo así a potenciar la actividad volcánica y tectónica), hoy sabemos que su relativa abundancia o escasez puede haber jugado un papel decisivo en la dinámica superficial y en la evolución térmica de muchos cuerpos.

El ejemplo de sustancia anticongelante más familiar es el de la sal común que durante el invierno se agrega al hielo para que éste se funda y evitar así la formación de placas en las calles o las carreteras. Cuando la sal común o cloruro

sódico ( $\text{NaCl}$ ) entra en contacto con el hielo, los iones se orientan alrededor de las moléculas de agua, que son polares, y forman un compuesto de cloruro sódico hidratado que recibe el nombre de eutéctico. En condiciones muy precisas de concentración (23,3 % de agua y 76,7 % de sal) se tiene un producto cuya temperatura de fusión-congelación es  $-21\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Si la proporción de sal es inferior a esta relación se forma entonces una mezcla de agua-eutéctica, que se funde a una temperatura, comprendida entre  $-21$  y  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Si la proporción de sal es superior, se tiene una mezcla sal-eutéctica que también se funde a una temperatura superior. Este comportamiento se puede representar mediante un diagrama de fases, un dibujo que representa la temperatura de fusión-congelación del agua en función de la cantidad de sal (Figura 27.4).

Algo parecido, aunque de forma mucho más efectiva, sucede con el amoníaco ( $\text{NH}_3$ ). El agua pura se congela a  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , mientras que una disolución de agua a presión atmosférica (0,1 MPa) que contenga un 33% de  $\text{NH}_3$  no se congelará hasta los  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Es decir, el amoníaco puede rebajar la temperatura de congelación hasta en cien grados (Figura 27.5). Esta propiedad nos lleva a pensar que este compuesto puede haber desempeñado un importante papel en la geología de aquellos mundos de hielo que muestran evidencias de actividad volcánica en superficie pero no cuentan con una clara fuente de energía.

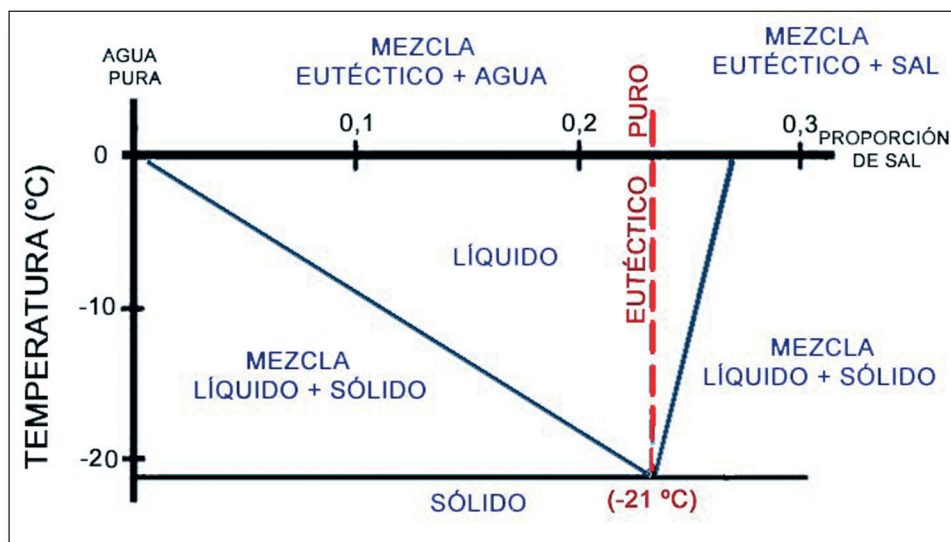


Figura 27.4. Diagrama de fases agua-sal a presión atmosférica. El eutéctico se forma en una proporción de agua del 0,2331 en masa (23,31 % de agua y 76,69 % de sal). En estas condiciones de concentración la temperatura de congelación desciende hasta los  $-21\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

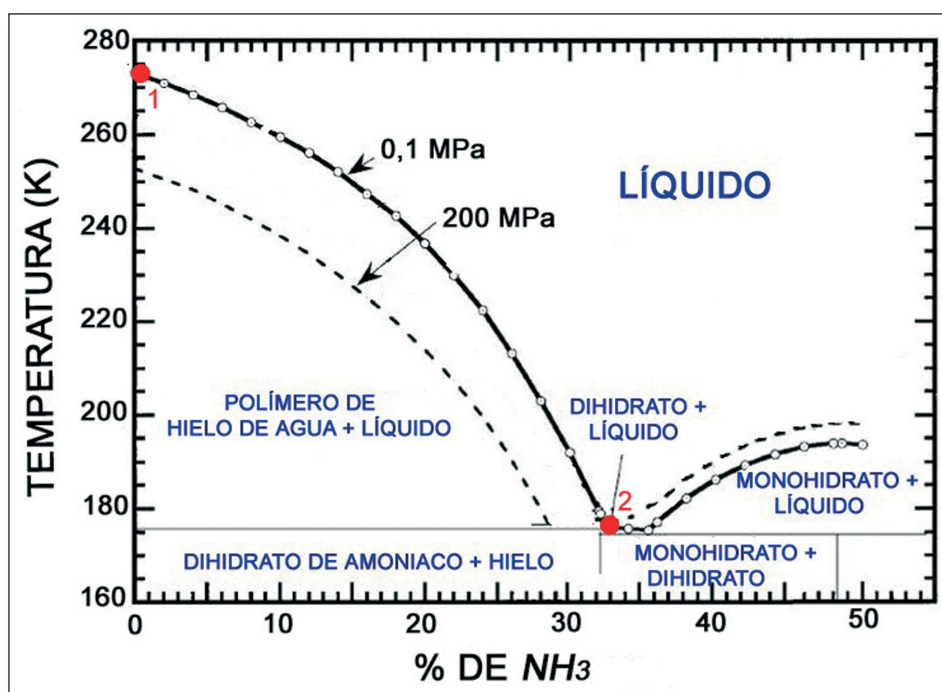


Figura 27.5. Diagrama de fases agua-amoniaco. El agua pura se congela a 0 °C (273 K en el diagrama), justo donde se encuentra el punto rojo 1. Sin embargo, una disolución de agua, en condiciones de presión atmosférica (0,1 MPa) o superior, que contenga un 33% de  $\text{NH}_3$  no se congelará hasta los -100 °C (173 K), que es precisamente donde se encuentra el punto rojo número 2. Es decir, el amoníaco, cuando se encuentra en la proporción adecuada, puede rebajar la temperatura de congelación del agua hasta en 100 grados, un valor más que suficiente para desencadenar fenómenos de criovulcanismo (Modificado de Hogenboom et al, 1997).

También existen sustancias anticongelantes capaces de rebajar el punto de fusión de los metales. Desde una perspectiva planetaria uno de los ejemplos más interesantes de metal que debería no estar fundido, pero que sin embargo lo está, lo encontramos en el núcleo terrestre. Según los datos sísmicos el núcleo tiene una densidad de entre 10 y 13 gramos por centímetro cúbico. Esta densidad coincide con la de numerosos elementos del sistema periódico (el vanadio, por ejemplo); sin embargo, la existencia de un campo magnético dipolar tan intenso como el que disfrutamos (pues nos protege de la radiación solar más peligrosa), sólo puede explicarse con la presencia de un elemento metálico en el núcleo. El hierro (Fe) es el único metal lo suficientemente abundante en el universo y en el Sistema Solar (como demuestran los sideritos, o sea meteoritos de hierro) para formar una masa tan importante como es la del núcleo. El inconveniente reside en que el hierro, en las condiciones de presión del núcleo,



es demasiado denso. ¿Qué elementos podrían rebajar su densidad? Por comparación con los sideritos, parece probable la existencia de níquel (4 %), pero esto cambia poco la densidad. Haría falta la presencia de un elemento ligero que además se disuelva en hierro fundido y forme aleaciones a alta presión. Los principales candidatos son el carbono (Figura 27.6), el silicio (Si), el oxígeno (O) y el azufre (S). Este último elemento cumple estos requisitos además de otros dos: ha aparecido troilita (SFe) en los meteoritos y puede rebajar hasta en 1.000 grados el punto de fusión, lo que ayudaría a que el núcleo externo fuera líquido. Este hecho, además de influir en la estabilidad de la geodinamo responsable del campo magnético terrestre (ver el capítulo 16), habría favorecido el ascenso de penachos térmicos desde el núcleo externo y, con ellos, el desarrollo de importantes episodios de vulcanismo en la Tierra.

Así pues, los modelos sobre formación planetaria a partir del disco protoplanetario involucran elementos químicos con propiedades termodinámicas bien conocidas, tales como: aluminio, hierro, níquel, silicio, carbono, hidrógeno y

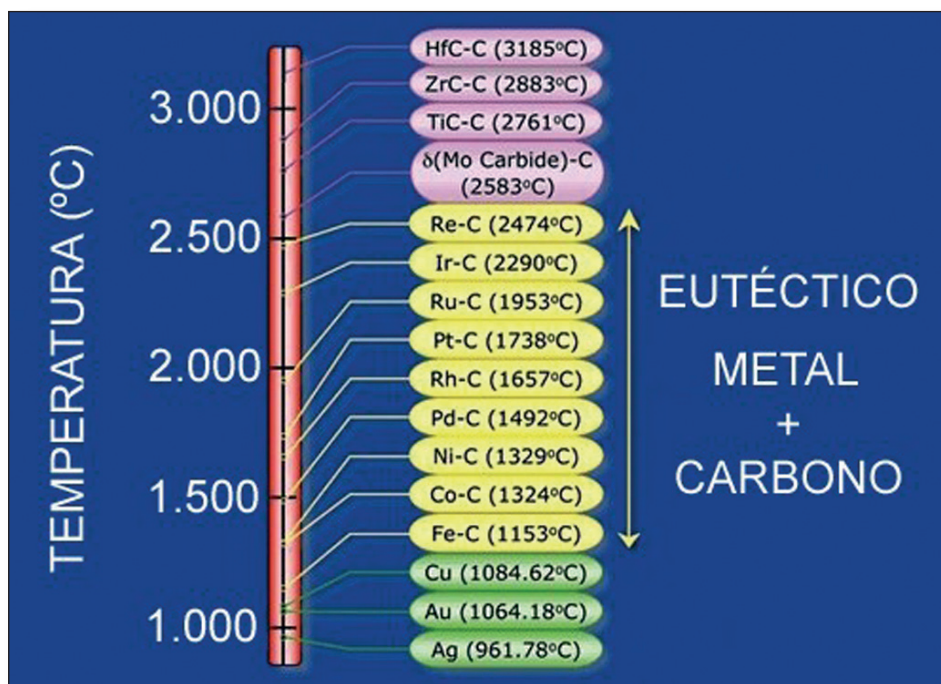


Figura 27.6. Eutécticos metal-carbono. El carbono se emplea en la metalurgia como elemento refrigerante para rebajar el punto de fusión de los metales. Para el caso concreto del hierro (Fe), cuyo punto de fusión es de 1.535 °C, el carbono puede rebajar esta temperatura en casi 500 grados. Tal y como se indica en la figura, la temperatura de fusión de una mezcla eutéctica Fe-C es de 1.153 °C. (Modificado de Yamada, 2005)



oxígeno. Con ellos las simulaciones describen bien la formación de Mercurio, Venus y la Tierra, pero tienen problemas al llegar a Marte. La razón es que, cuando se ha intentado modelizar su formación, los especialistas se han encontrado con que desconocían buena parte de las propiedades de solidificación de los compuestos del azufre. Compuestos que, como hemos visto para el caso del núcleo terrestre, pueden haber jugado un papel crucial en la geología de un cuerpo que muestra evidencias de haber conocido un vulcanismo muy activo además de un fuerte campo magnético residual.

En conclusión, podemos afirmar que la abundancia o escasez de ciertos elementos y compuestos ha debido jugar un papel determinante en la evolución de algunos mundos. Pero como hemos visto, la composición de un cuerpo depende, en última instancia, del lugar de la nebulosa protoplanetaria donde se formó... De lo que se deduce que conocer dónde se ha nacido es más importante de lo que Gould suponía, al menos en lo que a lunas y planetas se refiere.

## **MÁS ALLÁ DEL HISTORICISMO**

Hoy nadie discute el importante papel que han jugado los acontecimientos catastróficos en la historia de los planetas y sus lunas, e incluso existe cierto consenso a la hora de aceptar que el medio cósmico (un concepto que engloba desde las colisiones catastróficas hasta las variaciones climáticas motivadas por cambios en la luminosidad solar o la presencia de un satélite capaz de estabilizar el eje de rotación) ha jugado un papel decisivo en su evolución. Buena parte de la geodiversidad observada podría explicarse sobre esta base, la del medio ambiente. Sin embargo, el planteamiento de Gould parece olvidar que no todos los cuerpos se formaron bajo las mismas condiciones iniciales de temperatura y composición. Recurriendo de nuevo a la atrevida comparación hecha entre planetas y personas, la pregunta esta vez sería: ¿por qué culpar al ambiente de una realidad que puede estar marcada por los genes? O dicho de otro modo, ¿realmente necesitamos recurrir a eventos singulares para explicar una geodiversidad que bien podría depender de las características propias e intrínsecas de cada cuerpo, como pequeños cambios en la composición capaces de controlar su historia térmica?

Dilucidar dónde se sitúa la frontera entre el azar, es decir, los avatares de la historia de cada cuerpo, y qué otra está plenamente controlada por sus propiedades intrínsecas y las condiciones iniciales, es uno de los grandes retos que la exploración espacial nos plantea. Sólo aceptando el reto de la exploración podremos llegar a descubrir algún día si la Tierra, nuestro hogar, es fruto del azar o de la necesidad.

## 28. TAXONOMÍA A LA MEDIDA

El concepto de planeta ha sido integrado en la sociedad como un conocimiento básico, seguro y probado. Sin embargo, la comunidad científica no lo tiene tan claro y las opiniones están enfrentadas. Por un lado hay quienes opinan que la postura adoptada por la Unión Astronómica Internacional es poco precisa. Por otro, los que creen que la tradición histórica es un patrimonio cultural que debe ser tenida en cuenta más allá del rigor científico.

La Astronomía nació de la mera observación del cielo. Las antiguas culturas del Mediterráneo, Mesopotamia y Oriente seguían el curso de las estrellas y establecían así tanto su calendario agrícola como sus ritos religiosos, 3.000 años antes de nuestra era. Tras varios milenios de paciente observación, descripción y catalogación, los sacerdotes-astrónomos babilonios fundaron la astronomía matemática planetaria. Esta disciplina sirvió a Aristóteles de base para concebir el Universo estructurado, jerarquizado y finito que posteriormente sería adoptado por el cristianismo, el judaísmo y el Islam.

Los primeros observadores no debieron tardar mucho en comprobar que unas pocas estrellas se movían sobre el fondo, en apariencia inmutable, de la bóveda celeste. Estos astros errantes, que recorrían con distinto ritmo la región de las estrellas fijas, fueron llamados por los griegos *planetai*, es decir, vagabundos. Según recogiera Claudio Ptolomeo en su obra *He mathematike syntaxis* (más conocida en su forma árabe, *Almagesto*), publicada en el siglo II d. C., siete eran los planetas que los astrónomos de la antigüedad creían que giraban alrededor de la Tierra: el Sol, la Luna, Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno. Esta visión del Cosmos, tan armoniosa y acorde con el dictamen de los sentidos, fue aceptada como verdadera durante más de quince siglos.

No fue hasta el siglo XVII cuando se demostró que todos los planetas, satélites y cometas giran alrededor del Sol obedeciendo a una misma ley: la gravitación universal. Isaac Newton allanó el camino de quienes mantenían que las fuerzas materiales habían creado sistemas solares nuevos y que el universo evolucionaba según unas *leyes naturales*. Este cambio de cosmovisión

científica o macroparadigma había dado ya sus primeros pasos un siglo antes de la mano de Nicolás Copérnico y su obra *Sobre las Revoluciones de los Orbes Celestes* (1543). Sin embargo, como nos recuerda Goethe, este alumbramiento, hoy considerado como uno de los mayores logros de la cultura occidental, no fue nada fácil, pues:

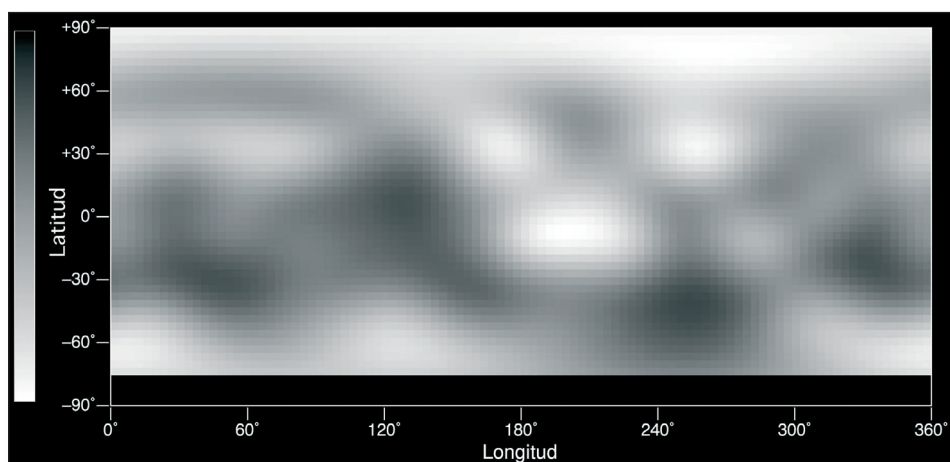
*«De todas las opiniones y descubrimientos, ninguna debe haber ejercido mayor efecto sobre el espíritu humano que la doctrina copernicana. Apenas el mundo había sido considerado como redondo y completo en sí mismo, cuando se le pidió que renunciara al tremendo privilegio de ser el centro del universo. Quizá nunca se haya hecho una petición tan exigente a la humanidad, ya que al admitirla, tantas cosas se desvanecían en humo y niebla. (...) No sorprende que sus contemporáneos rehusaran perder todo esto y presentaran toda la resistencia posible a una doctrina que autorizaba y exigía de sus conversos una libertad de miras y una grandeza de pensamiento desconocidas, ni tan siquiera soñadas, hasta entonces».*

La llamada Revolución Copernicana no sólo desencadenó un cambio radical en nuestra concepción del Universo, sino que introdujo, además, una nueva forma de pensar y afrontar la ciencia. Se descubrió una idea sobre la que nadie había reparado antes, debido a la inercia del estilo griego: si queremos estudiar una cosa conviene poner en duda todos los postulados previos, examinándola en detalle, cuidadosamente y sin prejuicios, mirando bien lo que tiene de particular y la distingue de las que se parecen a ella. Gracias a esta duda, la misma que plantea Descartes como primer precepto en su *Discurso del Método* (1637), el racionalismo logró vencer los prejuicios que venían impuestos por la tradición y los sentidos, desencadenando con ello una revolución cultural y social sin precedentes. Como el físico Antonio Fernández Rañada nos recuerda en su magnífico ensayo *Los muchos rostros de la ciencia*:

*«La combinación del método experimental y el análisis matemático permitía afirmar que las creencias pueden ser sometidas a crítica, y saber si una afirmación es verdadera o falsa, y que su verdad no depende, por tanto, de la riqueza o el poder de quien sustenta una afirmación, sino de un análisis usando la razón humana».*

Hoy podemos afirmar que la Revolución Científica nace de espectaculares triunfos intelectuales en los campos de la astronomía planetaria y de la ciencia física europea que, entre otros logros, reorganizó el estatus de los cuerpos celestes: el Sol pasó a ser una estrella más, la Luna fue a parar al mismo cajón que las estrellas mediceas de Galileo, y la Tierra dejó de ocupar el centro del universo conocido para codearse con los demás planetas del Sistema Solar.

Algunos de los descubrimientos más celebrados en esta primera infancia de las ciencias planetarias se fundamentaron en la aplicación directa tanto de la recién nacida mecánica newtoniana, que alcanzó una gran fama al lograr predecir con asombrosa precisión y en un margen de dos décadas la posición de Urano y Ceres, el mayor de los asteroides del cinturón principal. Cuarenta y cinco años después, en 1846, Leverrier y Galle descubren el último de los grandes cuerpos que conforman nuestra vecindad planetaria: Neptuno. Y finalmente, en 1930, el astrónomo norteamericano Clyde Tombaugh descubrirá Plutón (Figura 28.1), perfilándose a partir de entonces la popular visión de un Sistema Solar constituido por nueve planetas.



*Figura 28.1. Mapa de Plutón realizado con imágenes obtenidas por el Telescopio Espacial Hubble. En la imagen se aprecian fuertes cambios de contraste (albedo), una clara evidencia de que la superficie de este planeta no es una capa de hielo lisa y homogénea (NASA).*

## EL DILEMA DE PLUTÓN

Cualquier estudiante con la lección bien aprendida no dudará en definir qué es un planeta, y recitará: «un planeta es un cuerpo celeste que describe una órbita, generalmente elíptica, de poca excentricidad, alrededor del Sol o de otra estrella a cuyo sistema pertenece, que no tiene luz propia, y es iluminado por la estrella en torno a la cual describe su órbita». Sin embargo, si reflexionamos un poco sobre esta sesuda definición (tomada literalmente del diccionario de la Real Academia de Ciencias Exactas Físicas y Naturales) descubriremos que la cosa no está tan clara como parece. Según ésta, cualquier asteroide podría considerarse un planeta mientras que Plutón, por contar con una órbita muy

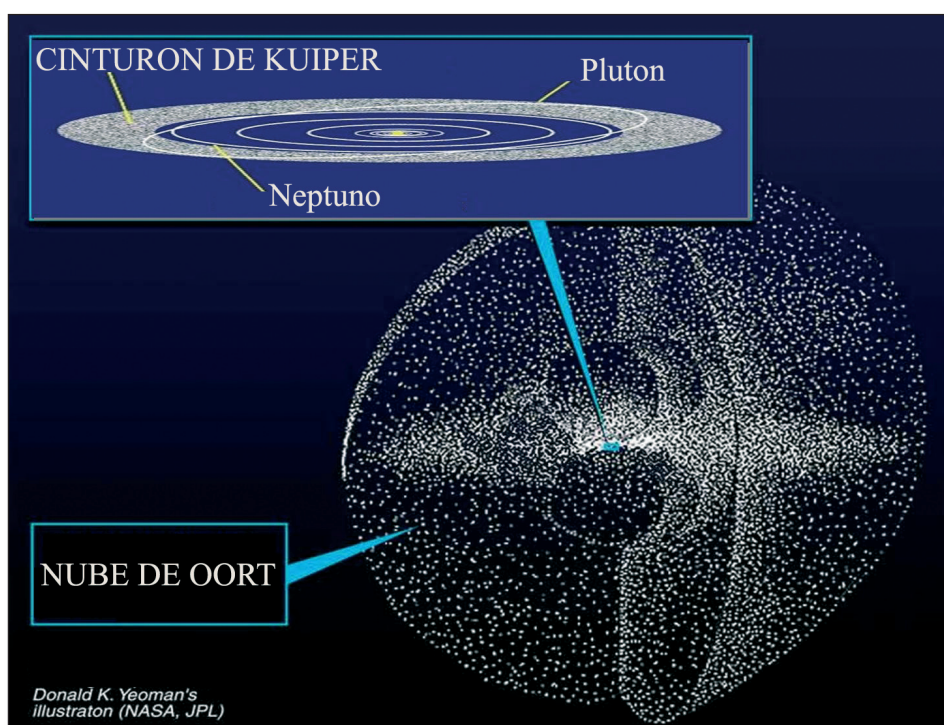
excéntrica e inclinada respecto a la eclíptica, no lo sería. Esta definición es poco precisa porque nada nos dice del tamaño mínimo que debe tener un cuerpo para que pueda ser clasificado como planeta. Por otro lado, la certeza de que el Sistema Solar no es el único sistema planetario del universo, nos induce a pensar que tal vez deberíamos ser un poco más rigurosos y precisos a la hora de seleccionar los criterios en los que sustentar una definición sin fisuras que aspire a ser aceptada por toda la comunidad científica.

La Unión Astronómica Internacional dictaminó en 1999 la siguiente definición de planeta: «*un planeta es un objeto en órbita alrededor de una estrella, que sea más pesado que Plutón y más ligero que la estrella más pequeña*». Pero claro, al leer esto nos asalta una duda: ¿hasta qué punto Plutón es un buen referente para sustentar la definición de planeta? Aquí es donde actualmente se centra el debate, y son muchos los especialistas que opinan que este cuerpo no debería ostentar semejante estatus. Pero, si además nos interesa el estudio de los planetas extrasolares, aún nos podría asaltar una segunda duda: ¿un planeta debe necesariamente girar en torno a una estrella? La verdad es que no estamos seguros. En el año 2001 se descubrieron en la región de Orión, a unos 1.000 años luz de la Tierra, lo que parecen ser planetas gigantes (de entre 5 y 15 veces la masa de Júpiter) que aparentemente no orbitan alrededor de una estrella. Son los llamados *planetas libres*.

A diferencia de los demás planetas del Sistema Solar, Plutón es una bola de roca y hielo. Cuando fue descubierto en 1930 se barajó la posibilidad de clasificarlo como un asteroide debido a su pequeño tamaño, sólo el doble que Ceres. Por otro lado, sigue una órbita muy excéntrica, que además se desvía 17° del plano de la eclíptica, por lo que periódicamente pasa de ser el noveno planeta a ocupar la octava posición por delante de Neptuno. Por esta razón algunos especialistas defienden que en realidad se trata de un cometa gigante, y defienden que la tenue atmósfera detectada en 1988 tiene su origen, igual que sucede en los cometas, en la sublimación de hielo como consecuencia del calentamiento que experimenta la superficie del cuerpo al aproximarse al perihelio de su órbita. En agosto de 1992 se localizó el primer objeto del Cinturón de Edgeworth-Kuiper, el enjambre de cuerpos pequeños, presuntamente cometas, que rodea al Sol más allá de Neptuno (Figura 28.2). Los objetos descubiertos hasta la fecha se asemejan bastante a Plutón en su composición, distancia al Sol y características orbitales. Esto ha dado lugar al concepto de plutino, esto es: un cuerpo que sigue una órbita semejante a la de Plutón y que mantiene una resonancia del tipo 3:2 con Neptuno (por cada 2 órbitas de estos cuerpos alrededor del Sol Neptuno efectúa 3).

308 Como vemos, actualmente disponemos de tres clasificaciones alternativas a la de planeta para Plutón: asteroide, cometa y plutino. Sin embargo, también





*Figura 28.2. El Sistema Solar no termina en Plutón. Más allá se extiende una vasta región de mundos de hielo y núcleos cometarios inertes, conocidas como Cinturón de Edgeworth-Kuiper y Nube de Oort (modificado de Donald K. Yeomans, 1994).*

son tres las razones por las que el noveno planeta aún no ha sido degradado en el escalafón celeste. Primero, no puede ser clasificado como un cometa porque se trata de un cuerpo binario (recordemos que su satélite es Caronte, el mundo que por pura serendipia descubriera James Christy en 1978) y carece de una coma visible. Segundo, por la voluntad de muchos astrónomos que no están dispuestos a aceptar que el único planeta con pasaporte estadounidense (recordemos que es el único planeta del Sistema Solar descubierto por un astrónomo de esta nacionalidad) baje a segunda división. Así se puso de manifiesto en la reunión que la Unión Astronómica Internacional mantuvo en febrero de 1999, donde se discutió el problema del estatus de Plutón y la opinión de los astrónomos norteamericanos se impuso por la fuerza de los votos. Y tercero, porque la tradición histórica tiene mucho peso en Astronomía, y a todos nos enseñaron en el colegio que Plutón es el noveno planeta.

## NUEVOS MUNDOS, NUEVAS LUNAS

En julio de 2005 varios grupos de investigadores anunciaron el descubrimiento de tres nuevos cuerpos en el *cinturón de Edgeworth-Kuiper*, objetos que

por el momento han sido bautizados con los nombres no oficiales de Santa, Easterbunny (Conejo de Pascua) y Xena. Los tres son de un tamaño parecido y tienen órbitas elípticas muy inclinadas con respecto al plano de la eclíptica. Santa es uno de los cuerpos más raros del Sistema Solar, pues las observaciones muestran que se asemeja a un trompo en rotación con forma de cigarro, cuyo lado mayor es de aproximadamente el mismo tamaño de Plutón. Su velocidad de rotación, apenas 4 horas, lo convierte en el más veloz del Sistema Solar. Tiene además una pequeña luna a la que han apodado Rudolph (como uno de los renos que tiran del trineo de Santa), que lo circunda en 49 días. El segundo cuerpo, Easterbunny, tiene las tres cuartas partes del diámetro de Plutón y en su superficie se ha detectado metano. Y el último, Xena, (oficialmente 2003 UB313), fue localizado en 2003 por Michael Brown y varios colaboradores del California Institute of Technology (Caltech) en Pasadena. En enero de 2005 anunciaron que se había observado un desplazamiento respecto al fondo estrellado, y en verano confirmaron que se trataba de un objeto de unos 2.390



*Figura 28.3. Representación artística de 2003 UB313, extraoficialmente conocido con el nombre de Xena, y su pequeño satélite Gabrielle. Este «nuevo mundo» se encuentra a 97 Unidades Astronómicas de nosotros, es decir, a 97 veces la distancia Tierra-Sol.*

kilómetros de diámetro, situado a unas 97 Unidades Astronómicas (es decir, 97 veces la distancia Tierra-Sol) y que además cuenta con un pequeño satélite. Técnicamente todas estas características lo convierten en el planeta más distante conocido del Sistema Solar (Figura 28.3).

Aunque inicialmente se le atribuyó un tamaño ligeramente superior a Plutón, un estudio liderado por el astrónomo Frank Bertoldi, de la Universidad de Bonn, Alemania, ha confirmado que Xena tiene cerca de 3.000 kilómetros de diámetro (700 kilómetros más que Plutón) y que refleja aproximadamente el 92% de la escasa luz que le llega procedente del Sol. Este brillo, comparable al de la nieve reciente, ha puesto en alerta a los geólogos... ¿Nos encontramos ante un nuevo ejemplo de posible actividad geológica reciente como el ya propuesto para Quaoar? (ver capítulo 17). Muchos investigadores consideran que apelar a vulcanismo activo para explicar el brillo de un objeto situado a tantos miles de millones de kilómetros se antoja un tanto aventurado. Quizá simplemente no comprendemos el proceso de cristalización y la fisicoquímica del nuevo tipo de superficies heladas al que nos enfrentamos.

### UNA ÚLTIMA SORPRESA

El 15 de mayo de 2005, la Cámara Avanzada para Programas de Observación (*Advanced Camera for Surveys*) del Telescopio Espacial Hubble, obtuvo las primeras imágenes de lo que podrían ser dos nuevos satélites de Plutón (Figura 28.4). Las investigaciones fueron lideradas por Max Mutchler, del Instituto de Ciencias del Telescopio Espacial, y por Hal Weaver, del Laboratorio John Hopkins de Física Aplicada. Sus resultados indican que las nuevas lunas, designadas con los nombres S/2005 P1 y S/2005 P2, se encuentran a unos 44.000 kilómetros de Plutón y tienen un diámetro de 64 y 200 kilómetros respectivamente (en comparación, el diámetro de Caronte es de 1.170 kilómetros).

### ¿ADIÓS A LOS PLANETAS?

En septiembre de 2005, pocos días después del descubrimiento de Xena, el equipo de expertos responsable de presentar a la Unión Astronómica Internacional el informe para determinar si Plutón es o no un planeta, propuso una solución radical: borrar el término *planeta* a secas, tal como se ha venido usando hasta ahora, y acompañarlo por un adjetivo. Según esta iniciativa, el término exacto a usar sería *objeto planetario*. Planetas terrestres serían la propia Tierra y sus vecinos hasta Neptuno. La expresión planetas transneptunianos se aplicaría para Plutón, Xena y sus compañeros (Figura 28.5). Planetas extrasolares para los que orbitan en una estrella diferente al Sol. Por el contrario, la propuesta de separarlos en terrestres y gaseosos, es decir, por adjetivos que indiquen su composición, fue desechada. En opinión de

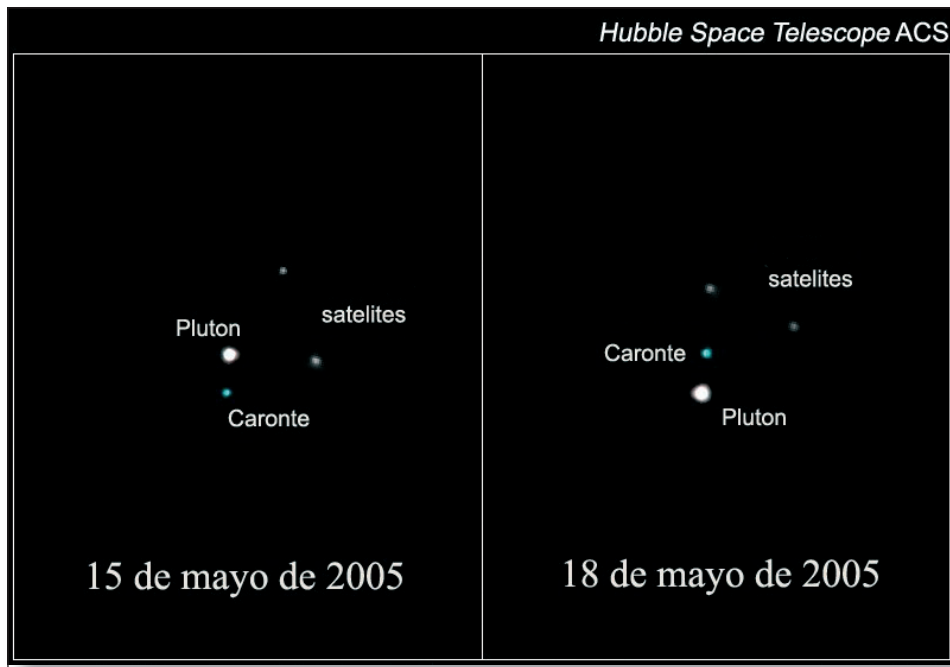


Figura 28.4. Dos instantáneas de los nuevos satélites de Plutón descubiertos en mayo de 2005 por el Hubble (NASA-ESA-H.Weaver-A.Stern-HST Pluto Companion Search Team).

los expertos, estos adjetivos podrían poner en aprietos a los astrónomos a la hora de nombrar a algunos cuerpos (planetas extrasolares sobre todo) de cuya naturaleza no estén absolutamente seguros.

Pero, como no podía ser de otro modo, a esta propuesta tampoco le faltan detractores. Algunos investigadores la tachan de *localista*, pues el criterio empleado no es otro que su localización respecto del resto del Sistema Solar. En opinión de Alan Stern, astrónomo del Instituto de Investigación de Suroeste en Colorado: «*se parece más a una guía de carretera que a una clasificación científica*».

La exploración de los arrabales del Sistema Solar, así como otros sistemas planetarios, está dando buenos resultados, pero aún no tenemos una idea clara de la disparidad de tamaños, órbitas o composiciones que nos podemos encontrar en ellos. En el horizonte se avista todo un *bestiario* de mundos de hielo, roca y gas que pueden ser víctimas de una taxonomía (ciencia de la clasificación) que se rija más por prejuicios humanos que por criterios puramente científicos. Los descubrimientos se suceden a un ritmo trepidante, y no resulta fácil encontrar pautas o generalidades con las que construir una definición. A pesar de todo nos empeñamos en realizar esta complicada tarea siguiendo, eso sí, la máxima de Protágoras: el hombre, o el Sistema Solar en su defecto, como medida de todas las cosas... Después de veinte siglos no hemos cambiado mucho.



Figura 28.5. Seis «objetos planetarios» (según la Unión Astronómica Internacional), cuatro de ellos transneptunianos. Todos los cuerpos están a escala. (Fotocomposición con imágenes de la NASA).

## Post Scriptum

El 15 de agosto de 2006, Owen Gingerich, presidente del comité de expertos seleccionado por la Unión Astronómica Internacional (UAI) para redactar una definición exacta de planeta, hacía público el resultado de dos años de trabajo. La propuesta de definición presentada ante los 2.500 miembros de la UAI durante su reunión trienal celebrada en Praga, proponía mantener a Plutón en su estatus y ampliar a 12 el número de planetas: Ceres, Caronte y Xena alcanzarían este privilegio. Ante la disconformidad de la mayoría de los asistentes, la comisión ejecutiva de la UAI se vio obligada a modificar la definición a toda prisa, aceptando sugerencias de los astrónomos interesados. La nueva propuesta, presentada el 24 de agosto y aprobada mediante votación a mano alzada, reza así: *Un planeta es un cuerpo celeste que (a) está en órbita alrededor del Sol, (b) tiene la masa suficiente para que su autogravedad sobrepase las fuerzas de cuerpo rígido de forma que toma la forma (casi redonda) de equilibrio hidrostático y (c) ha despejado sus inmediaciones a lo largo de su órbita.* En la propuesta se incluyó la definición de planeta enano, la misma que la de planeta con la salvedad de que la afirmación en (c) se torna en negación: *No ha*



*despejado sus inmediaciones a lo largo de su órbita y se añade (d) no es un satélite. Y también se incorpora una tercera categoría: Todos los demás objetos que orbitan el Sol se conocerán colectivamente como Cuerpos Pequeños del Sistema Solar. Con ello Plutón pasa a ser un planeta enano y se le reconoce como prototipo de una nueva categoría de objetos transneptunianos, los “plutones” (que no plutinos, como informalmente se los venía denominando). Como podemos comprobar, la definición de planeta vuelve a estar forzada con respecto al Sistema Solar, y la gran cuestión del límite superior de masa para los planetas extrasolares queda sin resolver.*

## 29. TODOS LOS PLANETAS

Desde que en diciembre de 1995 los astrónomos suizos Michel Mayor y Didier Queloz descubrieran el primer planeta gaseoso en torno a la estrella 51 Pegasi, la lista de exoplanetas no ha dejado de crecer a un ritmo vertiginoso. Los planetólogos trabajan ya con un surtido que supera los 150 mundos repartidos por más de un centenar de sistemas distintos. La variedad de cuerpos detectados es abrumadora, pero el hallazgo de nuevos tipos de planetas no hace sino acrecentar nuestras dudas: ¿Qué parámetros son los que determinan tanta variedad? ¿Es posible predecir lo que aún nos queda por descubrir? ¿Podemos soñar con una planetología comparada?

Antes de 1995 los astrónomos esperaban detectar en torno a otras estrellas planetas análogos a los cuerpos gaseosos de nuestro Sistema Solar, con órbitas prácticamente circulares y semiejes mayores comprendidos entre las 5 y las 30 UA. Pero un rápido vistazo a cualquier catálogo de exoplanetas nos permite comprobar que las previsiones no se han cumplido. La mayor parte de los mundos descubiertos hasta el momento son enormes bolas de gas de entre 0,1 y 10 veces la masa de Júpiter, semiejes mayores por debajo de las 0,1 Unidades Astronómicas, órbitas muy excéntricas y períodos de revolución de apenas unos pocos días. Quizá los sistemas como el nuestro sean frecuentes en el Universo, pero sin duda son difíciles de detectar con los métodos y la tecnología disponibles. En cualquier caso, y a la vista de los resultados obtenidos, podemos vaticinar que no va a ser nada fácil diseñar un modelo coherente que nos permita explicar la formación de tan exóticos sistemas planetarios.

El 31 de agosto de 2004 la NASA anunció el descubrimiento de cuatro planetas girando en torno a la estrella 55 Cancri, situada a 14 años luz de nosotros. Este primer sistema cuádruple cuenta con un pequeño planeta de entre 10 y 20 veces el tamaño de la Tierra y describe una órbita completa alrededor de su estrella en apenas 3 días. Con un tamaño comparable al de nuestro vecino Neptuno, este hallazgo ha venido a confirmar la existencia de un tipo de planetas mucho más pequeños que los detectados hasta la fecha(Figura

29.1). El primer representante de esta nueva especie planetaria fue localizado en 2002 girando en torno a la estrella 436 Gliese, a unos treinta años luz de nosotros, y ya en su momento fue considerado por los especialistas como un espécimen de singular rareza. Sin embargo, la confirmación de la existencia de otro cuerpo de similares características ha servido para reforzar la idea de que no se trata de un exotismo, sino de una nueva clase de mundo. Este hallazgo ha sido especialmente valorado por una comunidad científica que ha sabido ver en ellos la promesa de una geología planetaria comparada.

En menos de una década hemos aprendido a encontrar planetas un orden de magnitud menor que los primeros hallazgos. El mensaje es claro: lejos del Sol podemos encontrar algo más que gigantes de tipo joviano (Figura 29.2). Un apasionante bestiario de mundos nos espera. Quizá el límite sea nuestra imaginación... o tal vez no.



Figura 29.1. Representación a escala del pequeño exoplaneta descubierto en torno a la estrella 55 Cancri, a 14 años luz de la Tierra. La temperatura en su superficie se estima en 1.500 grados. (JPL/NASA)

## EL NUEVO BESTIARIO

¿Podemos llegar a predecir a grandes rasgos las principales características de los nuevos mundos que aún nos quedan por descubrir? La respuesta es sí, aunque con algunas reservas. Los factores que determinan qué planetas pueden o no existir lejos del Sol son básicamente tres: estabilidad física y termodinámica, cosmoquímica y contingencia de procesos a escala temporal.

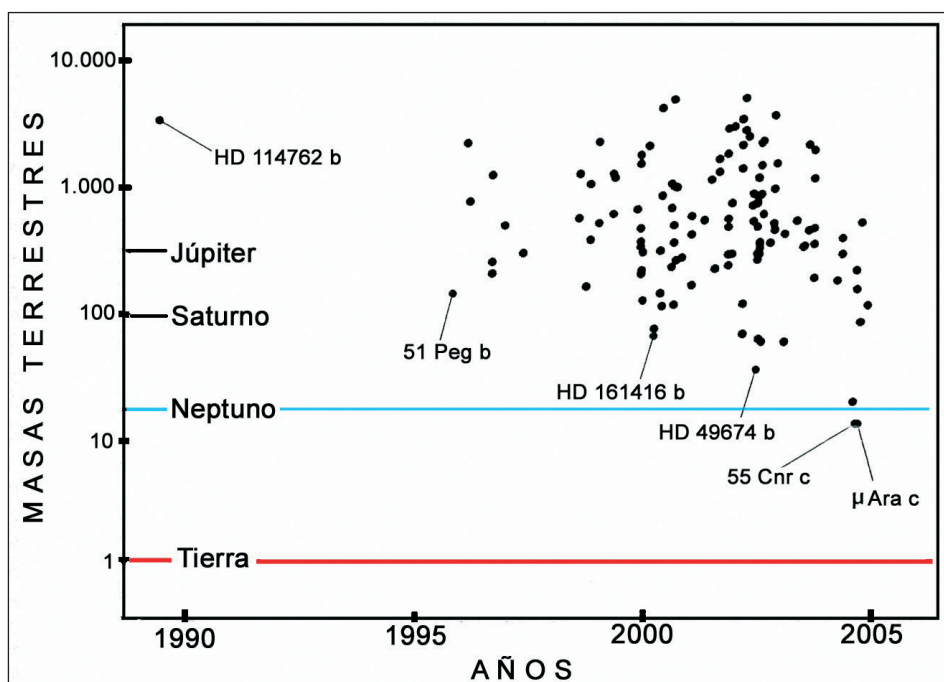


Figura 29.2. Evolución de las masas planetarias (léase tamaños) que los investigadores han logrado detectar en torno a otras estrellas en el periodo de tiempo comprendido entre 1995 y 2005. Cada punto representa un planeta; los más pequeños, con un tamaño inferior a Neptuno comenzaron a ser descubiertos en 2004. La línea azul marca la frontera de los mundos de hielo conocidos (Neptuno). La línea roja señala la frontera de los planetas semejantes a la Tierra (Modificado de Santos et al. 2005)

Para los investigadores resulta mucho más sencillo determinar si un sistema es inestable que predecir su estabilidad. O en otras palabras: es menos arriesgado asegurar que un determinado tipo de planeta es teóricamente imposible, porque viola alguno de los principios básicos de la física o la termodinámica, que predecir su existencia al margen de estos mismos principios. Así, el descubrimiento de planetas gaseosos muy próximos a sus estrellas resultó ser toda una sorpresa para una comunidad científica que nunca se habría atrevido a predecir la formación de un sistema tan inestable. Recordemos que por lo que sabemos (o creemos saber) en la nebulosa solar primitiva los materiales que formaron los planetas se condensaron en función de la temperatura, y que ésta básicamente dependía de la proximidad o lejanía al protosol. Resulta difícil imaginar la formación de un planeta gaseoso en la órbita de Mercurio, el lugar de la nebulosa protoplanetaria donde se condensaron los metales y silicatos, sencillamente porque la temperatura en esta región debía ser demasiado alta como para permitir la condensación de gases o la formación de mundos de hielo. Gracias al estudio de estos sistemas, llamémoslos anómalos, hemos aprendido

que los procesos de migración planetaria son más frecuentes y rápidos de lo que se pensaba hace una década, lo que nos hace ser especialmente desconfiados con todos aquellos argumentos que relacionan composición de un cuerpo y distancia de formación con respecto a su estrella. Es decir, que un mundo de gas se encuentre en una órbita como la de Mercurio no implica necesariamente que se formara allí, lo más probable es que haya migrado hasta esta posición por efecto de alguna resonancia u otro tipo de inestabilidad orbital.

La cosmoquímica es el legado de la síntesis termonuclear y la evolución estelar. Nuestra inclinación a interpretar los planetas extrasolares de masa joviana como grandes bolas de hidrógeno y helio (a pesar de que no contamos con información exacta sobre su tamaño y composición) no es más que un prejuicio heliocentrista (nunca más oportuno) guiado por principios de química básica: puesto que éstos son los elementos más abundantes, es de esperar que

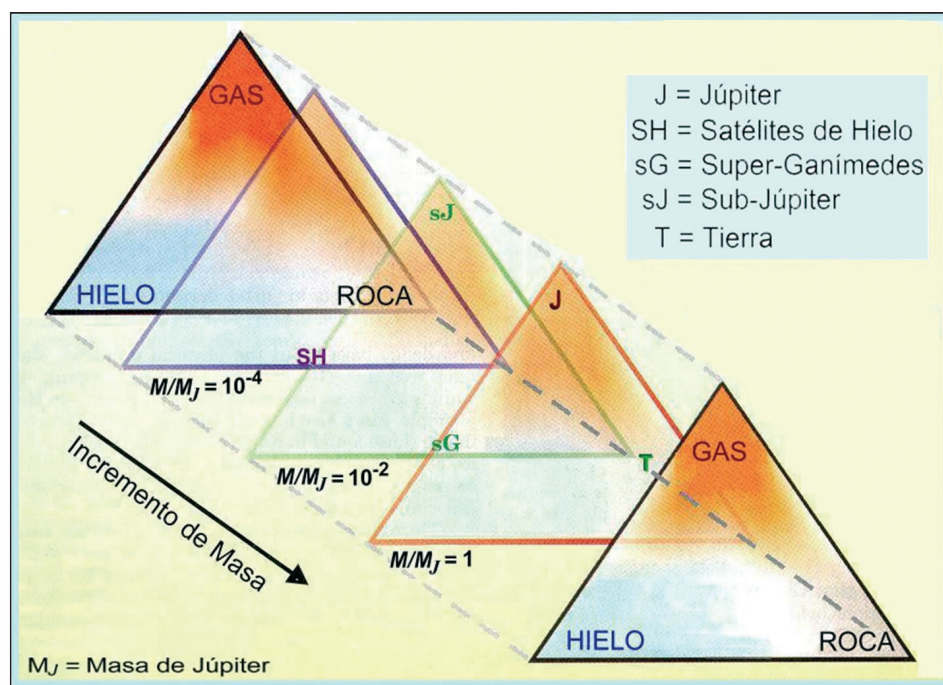


Figura 29.3. El investigador David J. Stevenson es el autor de este diagrama especialmente diseñado para, según él, «poder clasificar cualquier planeta del Universo». Para ello es necesario conocer dos parámetros: masa y composición. La composición se proyecta en los triángulos según el porcentaje de hielo, roca o gas de cada cuerpo. Para proyectar la masa se emplea el eje de la tercera dimensión. Las letras señalan la ubicación de: Júpiter (J), la Tierra (T) y los satélites de hielo (SH). Se incluyen además dos tipos de cuerpos que no existen en el Sistema Solar: un cuerpo como Ganímedes pero mucho más masivo (sG) y un planeta de tipo Júpiter pero con mucha menos masa (sJ). (Modificado de Stevenson, 2004).



los grandes planetas estén constituidos por ellos. Así, por ejemplo, podemos predecir la no existencia de un planeta joviano de hierro puro porque, entre otras razones, posiblemente no haya suficiente hierro disponible en el medio cósmico. Podemos imaginar la formación de mundos gigantes de hidrógeno porque es el elemento químico más abundante (está más «a mano» en el Universo); o lo contrario: planetas pequeños de roca y metal porque de no estar congelados o sometidos a una fuerte gravedad los volátiles son muy inestables.

Podemos afirmar que la contingencia es el parámetro que en último término nos permite explicar por que las cosas llegan a ser lo que son. Es el único de los tres que sólo puede ser analizado a posteriori pues, aunque en principio podemos intentar reconstruir la historia de cualquier cuerpo, lo que no podemos hacer es predecirla con antelación. Este parámetro sólo puede ser abordado científicamente a través de un ejercicio de planetología comparada, para lo cual necesitamos conocer con cierta exactitud al menos el tamaño, la masa y la composición de un significativo número de cuerpos de características similares. Sólo cuando dispongamos de una muestra suficientemente representativa (quizá un centenar de mundos), estaremos en condiciones de poder predecir con cierto margen de seguridad cuáles son los «eslabones perdidos» que nos faltan por descubrir en la cadena de la evolución planetaria.

## UN FUTURO PROMETEDOR

Descubrir un planeta como la Tierra alrededor de otras estrellas es el gran reto que la ciencia se ha marcado para las primeras décadas de este siglo, y las agencias espaciales ya se han puesto manos a la obra. En Agosto de 2003 Canadá lanzó el MOST, un telescopio orbital capaz de seguir el tránsito de exoplanetas gigantes muy próximos a sus estrellas. Para el 2006 se prevé el lanzamiento del telescopio francés COROT; y poco después, en 2007, será la NASA quien entre en escena con la esperada misión *Kepler*. Es muy probable que una de estas dos misiones encuentre el primer planeta rocoso en torno a una estrella de la secuencia principal antes de que finalice la década. Los ambiciosos programas *Darwin* y *Terrestrial Planet Finder*, a desarrollar a partir de 2010, tienen por objetivo descubrir el primer planeta de tipo terrestre y obtener su espectro. Quizá para el 2030 entre en escena el *Terrestrial Imager Planet*, y tal vez entonces el sueño de muchos geólogos se haga realidad: descubrir que nuestra ciencia no tiene límites.



## VI. EPÍLOGO

*«La astronomía es útil porque nos eleva por encima de nosotros mismos; es útil porque es grande, porque es bella; he ahí lo que es necesario decir.*

*Ella es quien nos muestra cuán pequeño es el hombre por su cuerpo y cuán grande es por el espíritu, puesto que a esa inmensidad resplandeciente donde su cuerpo no es más que un punto oscuro, su inteligencia puede abrazarla enteramente y gustar de su silenciosa armonía. Así llegamos a la conciencia de nuestra fuerza y esto es lo que no podríamos adquirir demasiado caro, porque esta conciencia nos vuelve más fuertes».*

**Henri Poincaré**

El valor de la ciencia, 1915



## 30. APOLOGÍA DE LA FRONTERA

¿Debemos dedicar dinero y esfuerzo al estudio de otros mundos cuando son muchos y muy graves los problemas que azotan a la humanidad? ¿Es rentable y necesaria la inversión que realizan las agencias espaciales? ¿Qué beneficios nos aportará enviar naves espaciales a otros planetas? ¿Qué consecuencias científicas y sociales tendría no afrontar el reto de la exploración espacial?

Vivimos en un momento histórico de la exploración planetaria. Las misiones a Marte se suceden a un ritmo vertiginoso, la nave *Cassini* nos sorprende cada día con nuevas y espectaculares instantáneas del sistema de Saturno, una nave viaja rumbo a Plutón, en breve volveremos a visitar Mercurio y Venus, exploramos cometas y asteroides, y los proyectos de investigación donde los términos *astro* y *biología* aparecen uno detrás del otro están de moda. Y no sólo la exploración robótica parece ir por buen camino. En enero de 2004 la Administración Norteamericana<sup>1</sup> anunció la reactivación de su programa espacial sobre tres pilares: renovación de la flota de transbordadores espaciales, finalización de la Estación Espacial Internacional (ISS) para el 2010, y construcción de una base permanente en la Luna para 2020... Asentamiento que previsiblemente servirá de trampolín para el primer viaje tripulado a Marte, previsto para un todavía lejano año 2030.

Paralelamente a estos hechos, hemos sido testigos de cómo en los medios de comunicación algunos periodistas, e incluso investigadores, despachaban frases del estilo: «Desde el punto de vista científico, volver a la Luna o ir a Marte tiene un interés nulo. Son planetas desolados, sin atmósfera, están lejísimos, el coste del viaje es enorme. Además, la Luna ha sido ya estudiada exhaustivamente. Es un auténtico disparate y requiere una inversión ingente con la que la ciencia debería resolver el problema de los mil millones de personas que hoy se mueren de hambre y sed». Incluso se ha llegado a afirmar que la jubilación anticipada del Telescopio

---

1. Este plan fue presentado el 14 de enero de 2004 por el presidente norteamericano George W. Bush, en un discurso hoy conocido con el título "Una nueva visión de la exploración espacial".



Espacial Hubble *«es la primera víctima del nuevo programa espacial de la Casa Blanca, orientado ahora hacia la conquista de la Luna y Marte»*. Estas declaraciones transmiten a los ciudadanos un *totum revolutum* de ideas y prejuicios que poco o nada tiene que ver con la realidad.

### **APOLOGÍA DE LA EXPLORACIÓN...**

Los graves problemas que azotan al planeta no son una consecuencia directa de la ciencia ni de quienes la practican, sino del uso perverso que de ella hacen quienes la sustentan: multinacionales, gobiernos, culturas y sociedades enteras. Por regla general no es frecuente que los científicos puedan decidir libremente sus líneas de investigación. Como dijo el sabio<sup>2</sup>, *«El que quiera filosofar ha menester ser libre»*; y hoy son pocos los científicos de reconocido prestigio que puedan presumir de costearse sus propias líneas de pensamiento. Un claro ejemplo de esto fue precisamente el Programa Apolo, el proyecto científico y tecnológico que hizo posible la llegada del ser humano a la Luna. Este programa fue interrumpido después de diecisiete vuelos, de un total de veinte previstos, no porque nuestro satélite hubiera sido estudiado exhaustivamente después de seis alunizajes, sino porque una vez alcanzado el objetivo de batir a la Unión Soviética en el que hasta entonces era su propio terreno, la Luna ya no interesaba a nadie más que a los científicos. Es cierto que conocemos algunas de las generalidades más importantes acerca de nuestro satélite, pero eso no significa, ni mucho menos, que haya sido estudiado de forma exhaustiva. Aquellos seis viajes no fueron más que una anécdota histórica en la que tan sólo participó un único astronauta científico, el geólogo Harrison Smith, y precisamente viajó en la última misión. El Proyecto Apolo se desarrolló en plena Guerra Fría, por lo que nunca escapó del control militar. Poco a poco hemos dejado que se perdiera la experiencia acumulada por aquella primera generación de pioneros, y el resultado (triste resultado) es que hoy, más de treinta y cinco años después de aquel logro tecnológico sin precedentes, no disponemos de la tecnología necesaria que nos permita volver a enviar astronautas a la Luna de forma segura a corto plazo.

La solución al hambre, las enfermedades y las injusticias sociales que padecen millones de personas no depende de la ciencia en sí misma ni de quienes la cultivan. Erradicar estos y otros graves problemas humanitarios pasa por un cambio de nuestro sistema económico y de valores, no por cancelar nuestros planes de exploración robótica del Sistema Solar. En contra de la opinión más extendida, la investigación espacial sí es una actividad rentable para la ciencia

---

2. Esta frase fue la elegida por Johannes Kepler para la portada de la carta que en 1610 envió a Galileo con motivo de sus primeras observaciones a través del telescopio.

y la sociedad. Cuando se pone sobre la mesa el coste de una misión planetaria el precio puede parecer excesivo, sobre todo si carecemos del marco de comparación adecuado. Sin embargo, el coste de muchos proyectos espaciales realmente no supera el presupuesto anual de una liga profesional de fútbol o un Mundial de Fórmula 1, por poner sólo un par de ejemplos sin caer en el tópico del siempre socorrido presupuesto militar.

La investigación planetaria es una de las empresas más rentables que existen, pues, una vez superado el desembolso inicial, los datos obtenidos pueden ser analizados durante décadas sin tener que realizar gastos adicionales; todo lo contrario a lo que sucede con los grandes laboratorios, que, si realmente desean ser competitivos, necesitan realizar una continua inversión en instrumental y equipos. Sólo citar dos ejemplos: las misiones *Viking* y *Voyager*. Estas dos naves han proporcionado ingentes cantidades de datos, en su mayor parte distribuidos gratuitamente entre la comunidad científica internacional, que han servido para hacer ciencia de primera línea durante más de veinte años. El caso concreto de las sondas *Voyager* es tan impresionante que sólo de pensarlo infunde respeto: un artefacto mecánico que cabría en la caja de una furgoneta, viajando por el espacio durante doce años, regateando alrededor de cuatro cuerpos gigantes y sus lunas asociadas para finalmente ir enviando fotografías impecables a través de cuatro horas luz de espacio. Sinceramente, no creo que exista un instrumento científico más rentable que una nave *Voyager*.

Más allá del conocimiento básico, la frontera espacial puede proporcionar a algunas disciplinas el revulsivo que necesitan para salir del marco teórico y epistemológico en el que se encuentran estancadas (sobre este tema me extenderé más adelante). La historia nos enseña que el principal motor que impulsan el conocimiento son los grandes desafíos y el pensamiento crítico contra los dogmas establecidos. En este sentido, las sociedades que han orientado su ciencia exclusivamente a resolver problemas prácticos, no sólo han terminado por abandonar la ciencia teórica, sino que han sufrido las graves consecuencias que se derivan del establecimiento en su sistema de valores una ética puramente tecnocrática e instrumental. Además, si la ciencia sólo se dedicara a las cosas aparentemente útiles quizá hoy no tendríamos en nuestras casas de bombillas, ordenadores personales, Internet o telefonía móvil, puesto que ninguno de ellos fue creado pensando en su potencial uso comercial.

Por otro lado, la crisis que actualmente atraviesan algunos proyectos de investigación espacial, entre ellos el *Hubble*, no tiene su origen en el nuevo y ambicioso programa norteamericano. El problema viene de lejos. Se trata de una consecuencia directa del grave error estratégico que la NASA cometió en la década de los noventa al embarcarse en la construcción de la Estación Espacial Internacional (ISS) sin antes haber desarrollado y puesto en servicio

una nueva generación de naves y lanzadores espaciales. La actual flotilla de transbordadores hace agua por todas partes, y a los desastres del *Columbia* y el *Challenger* debemos ahora sumar los defectos de diseño descubiertos en los sistemas de aterrizaje y en los escudos térmicos de los demás aparatos. La situación es tan grave que se ha decidido restringir al máximo su uso hasta que sean definitivamente retirados en el año 2010. Durante todo este tiempo los transbordadores que quedan se emplearán exclusivamente para terminar de construir la ISS, y es por ello que no está claro si podrán realizar las misiones de mantenimiento previstas para el *Hubble*, reparaciones que son cruciales para la supervivencia del telescopio-satélite a medio y largo plazo.

El debate sobre si es o no moral invertir en ciencia espacial con fines pacíficos es en sí mismo perverso, pues nace del distanciamiento que existe entre la cultura científica y la sociedad. Inquieta pensar que vivimos inmersos en una sociedad donde los miembros que la componen y deciden su futuro viven de espaldas a la ciencia y la tecnología que sustenta su trabajo, su ocio, su calidad de vida, su desarrollo económico y hasta su sistema de valores. La historia nos enseña que toda sociedad que vive de espaldas a la realidad está condenada al fracaso. Como dijo Ortega y Gasset: «*toda realidad ignorada prepara su propia venganza*». Investigadores, docentes y divulgadores tenemos la responsabilidad de fomentar y popularizar el interés por el conocimiento. Nuestro futuro depende de ello.

### ... Y DE LA CIENCIA BÁSICA

La perspectiva histórica que nos brindan las cuatro décadas transcurridas desde el comienzo de la exploración del Sistema Solar, nos permite ver que esa tarea se inició partiendo de unos conocimientos rudimentarios sobre la dinámica global de nuestro planeta. El modelo de tectónica de placas, paradigma actual de la Geología y la Geofísica terrestres, apenas si había dado sus primeros pasos. Nos aventuramos a estudiar otros astros con un equipaje lleno de prejuicios y una Geología geocéntrica por definición. Desde entonces hemos visto crecer y enriquecerse nuevos modelos sobre el origen y la evolución de nuestro entorno planetario. Gracias a la exploración espacial hemos descubierto que vivimos en un entorno cósmico en el que prima la diversidad y la individualidad. Planetas y satélites muestran una gran variedad de formas y paisajes que son fiel reflejo de las complejas interacciones que mantienen la materia y la energía. Sin embargo, desconocemos si esta geodiversidad responde en realidad a una disparidad en las condiciones iniciales del sistema o, por el contrario, tiene su origen en divergencias evolutivas controladas por el azar.

326 A pesar de lo aprendido, cuando llega la hora de abordar el estudio de otros mundos, seguimos el modelo geológico terrestre porque es el único que

manejamos con seguridad. Ahora bien, imaginemos que fuéramos geólogos marcianos. Es muy probable que hubiéramos desarrollado nuestra ciencia desde un punto de vista exclusivamente catastrofista, porque nuestros objetos de estudio serían tormentas de polvo globales, gigantescos volcanes, inundaciones de dimensiones planetarias, océanos intermitentes e impactos asteroidales. Seguramente nunca habríamos enunciado un dogma semejante al de la Geología terrícola según el cual *el presente es la clave del pasado*, porque, sencillamente, los procesos geológicos que marcaron el pasado marciano no tienen casi nada que ver con los actuales. No hay duda de que desde este peculiar punto de vista los problemas surgirían cuando intentáramos estudiar la Tierra siguiendo exclusivamente nuestro peculiar modelo geológico. ¿Seríamos capaces de construir entonces un modelo de tectónica de placas para la Tierra? Extrapolamos ahora este ejemplo para el resto de planetas. ¿No podría pasarnos lo mismo que a esos geólogos marcianos, catastrofistas por necesidad?

Cuatro son las lecciones que podemos extraer de estos cuarenta años de exploración planetaria.

**-Primera lección.** Todos los procesos que reconocemos en otros cuerpos planetarios pueden ser explicados, en último término, por principios y leyes estudiados en la Tierra. Es decir, con la física y la química aprendida en «casa» podemos lanzarnos a explorar el Sistema Solar.

**-Segunda lección.** La perspectiva histórica es esencial. Gracias a las misiones espaciales podemos reconstruir la historia de otros planetas y satélites del entorno solar. La exploración espacial nos desvela la parte de la historia primigenia de nuestro planeta que ha sido borrada por 4.500 millones de años de actuación de los procesos geológicos.

**-Tercera lección.** El medio cósmico influye en la evolución de los cuerpos planetarios. En el concepto de medio cósmico tienen cabida desde impactos asteroidales y cometarios hasta efectos de marea por resonancias orbitales o los efectos de la radiación electromagnética procedente del Sol.

**-Cuarta lección.** Procesos semejantes en cuerpos parecidos producen distintos resultados. En este punto es donde debemos admitir que no terminamos de comprender qué procesos son los que, en último término, hacen que dos cuerpos que en teoría deberían ser parecidos por su tamaño, composición y distancia al Sol, presenten un aspecto radicalmente distinto. Por lo tanto, si bien podemos abordar su estudio con la física y la química aprendidas en la Tierra (primera lección), con la geología no lo tenemos tan fácil. El modelo geológico

terrestre no es una receta que podamos aplicar al estudio de otros mundos. De esta última reflexión se deduce que existe un alto grado de contingencia en la evolución de cualquier objeto celeste. Es por ello que si algún día llegamos a estudiar detalladamente planetas de otros sistemas, nos toparemos con un variado zoológico de mundos con peculiaridades propias que nos obligarán a crear nuevos modelos.

Estas cuatro lecciones nos enseñan que posiblemente podremos abordar su estudio con la ciencia que hemos aprendido en nuestro entorno cósmico más inmediato, pero será una tarea a realizar por equipos interdisciplinarios. Necesitaremos mantener un espíritu crítico con los modelos establecidos y una mentalidad muy abierta hacia opiniones alternativas; porque, como bien afirma el paleontólogo David Raup, *«las disciplinas a las que les falta agitación probablemente tienen problemas: o no tienen personas creativas o el dogma convencional es tan fuerte que el cambio resulta imposible»*. Las ciencias de frontera se alimentan de espíritus libres.

### ¿POR QUÉ EXPLORAR?

La exploración planetaria tiene la virtud de acercar a los ciudadanos la actualidad científica. Estimula nuestra curiosidad y nos ofrece un marco de referencia para contemplar la ciencia desde la globalidad. Estudiar los planetas nos ayuda a tener una nueva perspectiva sobre el mundo y sus dimensiones. Aprendemos que la Tierra, y todo lo que contiene, no es más que una gota de agua en un océano cósmico; pero también comprendemos lo especial que es este punto azul en el que vivimos, y que formar parte de él nos hace ser importantes. Parafraseando a Platón<sup>3</sup>, esta exploración purifica y reanima un órgano del alma extinguido y embotado por las demás ocupaciones de la vida; órgano cuya conservación nos importa mil veces más que los ojos del cuerpo, puesto que sólo por él se percibe la verdad.

La exploración del Sistema Solar es la última gran aventura a la que se enfrenta la humanidad, una apasionante frontera física e intelectual que está ahí mismo, al alcance de todos... sólo debemos dejarnos llevar por el rumor de los planetas.



## VII. BIBLIOGRAFÍA

*«Cuando yo le preguntaba por qué leía las obras ajenas, me decía que era para conocer los robos de los otros, y que si él hubiese sido juez de esa clase de crímenes los hubiese castigado con penas más rigurosas que las que se aplican a los grandes bandoleros de los caminos, porque siendo la gloria algo mucho más precioso que un traje, que un caballo o que el mismo oro, los que la consiguen por libros que componen con cosas que roban a otros eran como esos bandoleros de caminos que viven a expensas de los que desvalijan, y que si cada uno hubiese procurado decir lo que no habían dicho los demás, las bibliotecas hubiesen sido menos numerosas, menos incómodas, más útiles, y la vida del hombre hubiese bastado para leer y saber todas las cosas buenas, y no que para encontrar una pasable es necesario leer cien mil que no valen nada o se han leído ya en otros sitios multitud de veces, y además nos hacen gastar el tiempo inútil y desagradablemente».*

**Savien de Cyrano de Bergerac**  
Viaje a la Luna, 1649.



# BIBLIOGRAFÍA

**Nota del Autor:** Dado el elevado número de coautores de algunas referencias bibliográficas, en algunas citas se ha optado por mantener la expresión “et al.” a continuación del primer firmante.

## GENERAL

- ANGUITA, F. y CASTILLA, G. [Coordinadores] (2003). *Crónicas del Sistema Solar*. Equipo Sirius, Madrid.
- ANGUITA, F.; CASTILLA, G.; ANGUITA, J.; CASTIÑEIRAS, P. Y GARCÍA, J. (2004). *Un Viaje Científico por el Sistema Solar*. (CD-ROM con 287 imágenes planetarias comentadas y cuestionadas). AEPECT–Ministerio de Educación y Ciencia, Madrid.
- BATTANER, E. (1991). *Planetas*. Alianza Editorial, Madrid.
- BEATTY, J.; PETERSON, C. CHAIKIN, A. [Editores] (1999). *The New Solar System*. Sky Publishing Corporation & Cambridge University Press, Cambridge.
- DE PATER y LISSAUER, J. (2001). *Planetary Sciences*. Cambridge University Press, Cambridge.
- GALADÍ-ENRÍQUEZ, D. y GUTIERREZ, J. (2001). *Astronomía General*. Ediciones Omega, Barcelona.
- GREELEY, R. y BATSON, R. (2001). *The Compact NASA Atlas of the Solar System*. Cambridge University Press. Cambridge.
- HARTMANN, W. K. (1990). *Moons and Planets*. Wardsworth, Belmont.
- HATHAWAY, N. (1994). *The Friendly Guide to the Universe*. (Trad. cast. *El universo para curiosos*. Crítica, Barcelona, 1996).
- JAKOSKI, B. (1998). *The Search for Life on Other Planets*. (Trad. cast. *La búsqueda de vida en otros planetas*. Cambridge University Press, Madrid, 1999).

## I. SOMNIUM

### 1. El patio de Karlova

- BANVILLE, J. (1981). *Kepler*. (Trad. cast. Kepler. Edhasa, Barcelona, 1990).
- CASPAR, M. (1947). *Johannes Kepler*. (Trad. cast. Johannes Kepler. Acento, Madrid, 2003).

- DAUXOIS, J. (1996). *L'empereur des Alchimistes*. (Trad. cast. *El emperador de los alquimistas*. Vergara, Buenos Aires, 1998).
- DREYER, J. L. E. (1953). *A History of Astronomy from Thales to Kepler*. Dover Publications, New York.
- FEYNMAN, R. (1965). *The character of physical law*. (Trad. cast. *El carácter de la ley física*. Orbis. Barcelona, 1987).
- KOESTLER, A. (1959). *The Sleepwalkers*. Hutchinson Publishing Group. London. (Trad. cast. parcial. *Kepler*. Salvat, Barcelona, 1988).
- SALFELLNER, H. (1998) *Franz Kafka und Prag*. (Trad. cast. *Franz Kafka y Praga*. Vitalis, Praga, 1999).
- VV.AA. *El Golem de Praga. Leyendas judías del gueto*. Vitalis, Praga, 2002.

## 2. Machina Mundi

- ANTOCCIA, L. et al. *Leonardo, arte e scienza; Leonardo, le macchine*. (Trad. cast. Leonardo Da Vinci. Arte y Ciencia. Las Máquinas. Susaeta, Madrid, 2004).
- ARAGO, F. (1962). *Grandes Astrónomos Anteriores a Newton*. Espasa-Calpe, Madrid.
- BRION, M. (1995). *Léonard de Vinci*. (Trad. cast. *Leonardo Da Vinci. La encarnación de un genio*. Ediciones B Argentina, Buenos Aires, 2005).
- GALILEO-KEPLER. *El Mensaje y el mensajero sideral*. Alianza, Madrid, 1984.
- HEMLEBEN, J. (1983). *Galileo* (Trad. cast. Galileo. Salvat. Baeclona, 1988).
- RIOJA, A. y ORDÓÑEZ, J. (1999). *Teorías del Universo*. Vol. II. *De Galileo a Newton*. Síntesis, Madrid.
- TATÓN, R. [Editor]. *Historia General de las Ciencias*. 15 Vol. Orbis, Barcelona, 1988.
- VV. AA. (1991). *Museo di Storia della Scienza, Firenze. Catalogo*. Giunti, Florencia.

## 3. Revolución

- ALEMAÑ, R. (1996). *Evolución y creación. Entre la ciencia y la creencia*. Ariel. Barcelona, 1996.
- CANUP, R. M. (2004). *Origin of Terrestrial Planets and the Earth-Moon System*. Physics Today, Abril, 56–62.
- CHALMERS, A.F. (1982). *What in this thing called science?* (Trad. cast. *¿Qué es esa cosa llamada ciencia?* Siglo Veintiuno. Madrid, 1998).
- ELLENBERGER, F. (1988). *Histoire de la Geologie. Tome 1. Des Anciens à la première moitié du XVIIe siècle*. (Trad. cast. *Historia de la Geología. Volumen 1. De la antigüedad al siglo XVII*. Labor. Madrid, 1989).
- GOULD, S. J. (1987). *Time's Arrow. Time's Cycle. Myth and Metaphor in the Discovery of Geological Time*. (Trad. cast. *La flecha del tiempo*. Alianza. Madrid, 1992)
- HALLAM, A. (1983). *Great Geological Controversies*. (Trad. cast. *Grandes controversias geológicas*. Orbis. Barcelona, 1994).
- KUHN, T. S. (1962) *The Structure of Scientific Revolutions*. (Trad. cast. *La Estructura de las Revoluciones Científicas*. Fondo de Cultura Económica. Madrid, 1982).

- PAPP, D. (1950). *El problema del origen de los mundos*. Espasa–Calpe, Buenos Aires.
- SANZ, J. L. (2004). *El universo cumple 6.000 años*. EL PAÍS, miércoles 20 de octubre. Sociedad, 43.
- TRIGO, J. M. (2001). *El Origen del Sistema Solar*. Editorial Complutense, Madrid.
- WETHERIL, G. W. (1981). *Formación de la Tierra a partir de planetesimales*. Investigación y Ciencia, 59 (Agosto), 87–97.
- ZIMAN, J. (1977). *La credibilidad de la ciencia*. Alianza Editorial, Madrid, 1981.

#### 4. Magia

- ARISTÓTELES. *Acerca del Cielo. Meteorológicos*. Gredos, Madrid, 1996.
- DUBRULLE–BREÓN, B. y GRANER, F. (1994). *Ninguna magia en el Sistema Solar*. Mundo Científico, 145, 376–378.
- HAYES, W. y TREMAINE, S. (1998). *Fitting Selected Random Planetary System to Titius–Bode Laws*. Icarus, 135, 549–557.
- KEPLER, J. (1619) *Armonices Mundi* (Libro V). En HAWKING, S. (2002). *On The Shoulders of Giants. The Great Works of Physics and Astronomy*. (Trad. cast. *A Hombros de Gigantes. Las grandes obras de la Física y la Astronomía* (pp 561– 642). Crítica, Barcelona, 2003).
- PLATÓN. *Filebo. Timeo. Critias*. Gredos, Madrid, 2000.
- RUPHY, S. (1999). *James W. McAllister: Unas teorías demasiado bellas para ser verdaderas*. Mundo Científico, 207, 80–82.
- SWIFT, J. *Los viajes de Gulliver*. Alianza, Madrid, 1999.
- VOLTAIRE. *Zadig, Micromegas y otros cuentos*. Fontamara, Barcelona, 1974.

#### 5. Visionarios de la frontera

- ALTER, A. y HAGENE, B. (1991) *Mille et une lunes*. (Trad. cast. *Mil y una lunas*. RBA Editores. Barcelona, 1994).
- COMPTON, W. D. (1989). *Where No Man Has Gone Before: A History of Apollo Lunar Exploration Missions*. NASA Special Publication 4214. Washington, D.C.
- DE LATIL, P. (1971) *El Firmamento*. Argos, Barcelona.
- EVANS, A. B. y MILLER, R. (1997). *Julio Verne, un visionario mal comprendido*. Investigación y Ciencia, 251 (Agosto), 5–9.
- HARDY, D. A. (1989). *Visions of Space. Artists Journey Through the Cosmos*. Dragon's World, Limpsfield (Reino Unido),
- MILLER, R. (1994). *Visiones astronómicas de Chesley Bonestell*. Investigación y Ciencia, 214 (Julio), 48–53.
- REYES, L. (1992). *Julio Verne*. Labor, Estella (Navarra).
- ROBINSON, F. M. (1999). *Science Fiction of the 20TH Century. An Illustrated History*. Collectors Press. Portland, Oregon (EE.UU).
- SAGAN, C. (1974). *The Broca's Brain. Reflections of the Romance of Science*. (Trad. cast. *El cerebro de Broca*. Crítica. Barcelona, 1999).



- VON BRAUM, W. y LEY, W. (1952). *Die Eroberung des Weltraums*. (Trad. cast. *La Conquista del Espacio*. Espasa–Calpe. Madrid, 1966).
- WEGENER, A. (1921). *The origin of lunar craters*. The Moon, 14 (1975), 211–236.

## 6. Serendipia

- ACUÑA, M. H. et al. (1999). *Global distribution of Crustal Magnetization Discovered by the Mars Global Surveyor MAG/ER Experiment*. Science, 284, 790–798.
- ANGUITA, F. et al. (1998). *Arabia Terra, Mars: tectonic and paleoclimatic evolution of a remarkable sector of martian lithosphere*. Earth, Moons and Planets, 77, 55–72.
- FEYERABEND, P. (1975). *Against Method: Outline of an Anarchistic Theory of Knowledge*. (Trad. cast. *Contra el método*. Folio, Barcelona, 2002)
- KERR, R. A. (1999). *Signs of Plate Tectonic On an Infant Mars*. Science, 284, 719–722.
- QUINTANILLA, M. A. (2003). *Mérito científico y casualidad*. EL PAÍS, miércoles 17 de diciembre. Sociedad, 33.
- ROBERTS, R. M. (1989). *Serendipity. Accidental Discoveries in Science*. (Trad. cast. *Serendipia. Descubrimientos accidentales en la ciencia*. Alianza. Madrid, 1992).
- SLEEP, N. H. (1994). *Martian plate tectonics*. Journal of Geophysical Research, 99, 5639–5655.

## 7. Vacaciones en Roma

- BELMONTE, J. A. y HOSKIN, M. (2002). *Reflejo del Cosmos. Atlas de Arqueoastronomía del Mediterráneo Antiguo*. Equipo Sirius, Madrid.
- BOSCA, G. y STROPPA, P. (1999). *Meridiane e orologi solare*. Il Castello, Milán.
- BRUSI, D.; MIRÓ, J. y SOLER, J. (1995). *La Geología y el calendario*. Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, 3 (2), 84–90.
- HEILBROWN, J. L. (1998). *Las iglesias, instrumentos científicos*. Mundo Científico, 190, 66–71.
- LERNER, L. S. y GOSSELIN, E. A. (1987). *Galileo y el fantasma de Bruno*. Investigación y Ciencia, 124 (Enero), 80–88.
- MANCINELLI, F. y CASANOVAS, J. (1980). *La Torre dei Venti in Vaticano*. Libreria Eritrice Vaticana (Archivio Segreto Vaticano), Ciudad del Vaticano.
- MESTURINI, G. (2002). *Viaggio attraverso le meridiane italiane a camera oscura*. Actas del XI Seminario Nazionale di Gnomonica. Verbiana–Indra, marzo de 2002.
- PETROSILLO, O. (1997). *Ciudad del Vaticano*. Edizioni Museo Vaticani, Ciudad del Vaticano.
- SHEA, W. R. y ARTIGAS, M. (2003). *Galileo en Roma. Crónica de 500 días*. Ediciones Encuentro, Madrid.
- ULANSEY, D. (1990). *Los misterios mitraicos*. Investigación y Ciencia, 161 (Febrero), 76–81.

## II. DE HARMONICE

### 8. A la deriva

- BENEST, D.; FARINELLA, P. y FROESCHLÉ, C. (1995). *El espíritu de familia de los asteroides*. Mundo Científico, 158 (Junio), 520–527.
- BINZEL, R. P.; BARUCCI, M. A. y FULCHIGNONI, M. (1991). *Origen de los asteroides*. Investigación y Ciencia, 183 (Diciembre), 66–73.
- CASANOVA, I. y LLORCA, J. (1997). *Actividad magmática en los asteroides*. Investigación y Ciencia, 249 (Junio), 76–83.
- CHAPMAN, C. R. (1999). *Asteroids*. En Beatty, J.; Peterson, C. Chaikin, A. [Editores]. *The New Solar System* (pp 337–350). Sky Publishing Corporation & Cambridge University Press, Cambridge.
- COX, D. y CHESTEK, J. (1998). *Doomsday Asteroid. Can We Survive?* (Trad. cast. *El Asteroide del Fin del Mundo*. Timun Mas. Barcelona, 1998).
- RUBIN, A. E. (2005). *¿Qué calentó los asteroides?* Investigación & Ciencia, 346 (Julio), 66–73.

### 9. Meteoritos en el desierto

- BORG, L. et al. (2003). *The age of Dar al Gani 476 and the differentiation history of the martian meteorites inferred from their radiogenic isotopic systematics*. Geochimica et Cosmochimica Acta, Vol. 67 (18), 3519–3536.
- GIBBS, W. W. (1999). *Meteoritos en hielos polares*. Investigación y Ciencia, 268 (Enero), 22–29.
- HOFMAN, B. A.; GNOS, E. y AL-KATHIRI, A. (2003). *Harvesting Meteorites in the Omani Desert: Implications for Astrobiology*. Proceedings of the III European Workshop on Exo-Astrobiology. Mars: The search for Life. ESA SP-545, 73–76.
- NORTON, R. O. (2002). *The Cambridge Encyclopedia of Meteorites*. Cambridge University Press, Cambridge.

### 10. Quizá mañana

- AGUSTÍ, J. (1996) [Editor]. *La lógica de las extinciones*. Tusquets, Barcelona.
- CARUSI, A. (1995). *Asteroides y cometas como amenaza para la Tierra*. Investigación y Ciencia, 228 (Septiembre), 4–12.
- CLOSE, F. (1988). *End. Cosmic catastrophe and the fate of the universe*. (Trad. cast. *Fin. La catástrofe cósmica y el destino del universo*. Crítica, Barcelona, 1991).
- CLUBE, V. y NAPIER, B. (1995). *The Cosmic Winter*. (Trad. cast. *El Invierno Cósmico*. Alianza, Madrid, 1995).
- LEVY, D. H.; SHOEMAKER, E. M. y SHOEMAKER, C. S. (1995). *El encuentro del cometa Shoemaker-Levy 9 con Júpiter*. Investigación y Ciencia, 229 (Octubre), 73–80.
- LUCRECIO. *De la naturaleza de las cosas*. Orbis, Barcelona, 1984.
- PLINIO EL VIEJO. *Historia Natural* (Libros II–IV). Gredos, Madrid, 2001.

- ROA, M. y PORTILLA, J. (2003). *Entrada de asteroides en atmósferas planetarias*. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias. Vol. 27 (105), 477–484.
- VV. AA: (1994). *Comet Shoemaker–Levy's Collision with Jupiter – As Seen by the Hubble Space Telescope*. ESA Bulletin, 79, 85–90.
- VIRGILIO, *La Eneida*. Planeta, Barcelona, 1982.
- WYNN, J.; SHOEMAKER, E. (1999). *Meteoritos en el desierto*. Investigación y Ciencia, 268 (Enero), 14–21.

### 11. Aprender a mirar

- ÁLVAREZ, W. (1997). *T. Rex and the Crater of Doom*. (Trad. cast. *Tyrannosaurus rex y el cráter de la muerte*. Crítica, Barcelona, 1998).
- BECKER, L. (2002). *Impactos repetidos*. Investigación y Ciencia, 308 (Mayo), 17–23.
- DÍAZ–MARTÍNEZ, E. (2004). *Registro geológico de eventos de impacto meteorítico en España: revisión del conocimiento actual y perspectivas de futuro*. En Pereira, B.; Bárcena, M.A.; RUBIO, I. y Sesma, J. [Editores]. *Aproximación a las ciencias planetarias*. Ediciones Universidad de Salamanca. Salamanca, 2004.
- ERNSTSON, K.; SCHÜSSLER, U.; CLAUDIN, F. y ERNSTSON, T. (2003). *An Impact Crater Chain in Northern Spain*. Meteorite (Agosto), 1–5.
- GRIEVE, R. A. (1990). *Formación de cráteres de impacto sobre la Tierra*. Investigación y Ciencia, 165 (Junio), 58–66.
- MELOSH, H. J. (1989). *Impact Cratering: A Geologic Process*. Oxford University Press.
- MONTEIRO, J. F. et al. (1997). *Ejecta from meteorite impact near the Cenomanian–Turonian boundary found at North of Nazaré*. Proceedings of the XXVIII Lunar and Planetary Science Conference, 1083.
- SANZ–RUBIO, E.; DÍAZ–MARTÍNEZ, E. y MARTÍNEZ–FRÍAS, J. (2000). *Searh criteria and evidence for impact–induced beds in the geological record of Spain*. Geotemas 1 (1), 199–203.
- Para obtener más información sobre Azuara y Rubielos pueden consultar la página web: <http://www.estructuras-de-impacto.impact-structures.com/index.htm>

### 12. Minería espacial

- ANÓNIMO. *Lunar Surface Exploration Strategy*. Lunar Exploration Science Working Group (LESWG) Final Report. Febrero, 1995.
- ANÓNIMO. *Recovery and Utilization of Extraterrestrial Resources. A Special Bibliography from the NASA Scientific and Technical Information Program*, 2004.
- CLARKE, A. C. (1987). *2061 Odyssey Three*. (Trad. cast. *2061 Odisea Tres*. Plaza & Janés, Barcelona, 1990).
- HARTMAN, W. K.; MILLER, R. y LEE, P. (1984). *Out of the cradle*. (Trad. cast. *De la cuna al espacio. La exploración de las fronteras extraterrestres*. Planeta, Barcelona, 1987).
- JONES, A. P. et al (2002). *Impact induced melting and the development of large igneous provinces*. Earth and Planetary Science Letters, 202, 551–561.

- LYONNET DE MONTIER, M. y COLLET, J. (1994). *Using Lunar Resources. The Next Step?* ESA Bulletin, 77 (Febrero), 59–68.
- REIMOLD, U. (2001). *The Vredeford Saga*. Geotimes, 20 (Marzo), 20–23.
- ROSS, M. (1981). *The ice layer in Uranus and Neptune. Diamonds in the sky?* Nature, 292, 435–436.
- SCANDOLO, S. y RAIMOND J. (2004). *El interior de los planetas*. Investigación y Ciencia, 336 (Septiembre), 6–16.

### III. MYSTERIUM

#### 13. Introducción a la Geofisiología

- FYFE, W. S. (1996). *The Biosphere Is Going Deep*. Science, 273, 448.
- LOVELOCK, J. (1988). *The Ages of Gaia*. (Trad. cast. *Las edades de Gaia*. Tusquets, Barcelona, 1993).
- LOVELOCK, J. (2003). *The living Earth*. Nature, 426, 769–770.
- MCKAY, C. P. (1990). *Urey Prize Lecture: Planetary Evolution and the Origin of Life*. Icarus, 91, 93–100.
- VOLK, T. (1998). *Gaia's Body*. (Trad. cast. *Gaia toma cuerpo. Fundamentos para una fisiología de la Tierra*. Cátedra, Madrid, 2000).
- WESTBROEK, P. (1997). *¿Es la Tierra un superorganismo?* Mundo Científico, 178, 378–379.

#### 14. La Luna y el clima

- BILLS, B. G. (1998). *An oblique view of climate*. Nature, 396, 405.
- BROECKER, W. y DENTON, G. (1990). *¿Qué mecanismo gobierna los ciclos glaciares?* Investigación y Ciencia 162 (Marzo), 48–57.
- DUPLESSY, J. C. (1997). *¿Hacia un enfriamiento de Europa?* Mundo Científico, 178 (Abril), 331–335.
- HARTMANN, W. K. (1998). *Una historia abreviada de la Luna*. Universo, 33 (Enero), 21–27.
- HOFFMAN, P. y SCHRAG, D. (2000). *La Tierra, una bola de nieve*. Investigación y Ciencia, 282, 38–45.
- KANDELL, R. y FOUQUART, Y. (1992). *El balance radiativo de la Tierra*. Mundo Científico, 124 (Mayo), 426–434.
- KELEINE, T. et al. (2005). *Hf-W Chronometry of Lunar Metals and the Age and Early Differentiation of the Moon*. Science, 310, 1671–1674.
- LASKAR, J. (1994). *La Luna y el origen del hombre*. Investigación y Ciencia, 214 (Julio), 70–77.
- MARTÍN-CHIVELET, J. (1999). *Cambios climáticos*. Libertarias/Prodhufl, Madrid.
- SPUDIS, P. (2004). *La Nueva Luna*. Investigación y Ciencia, 329 (Febrero), 40–47.

## 15. Un mar de rocas

- BURNS, J. A. (1999). *Planetary Rings*. En Beatty, J.; Peterson, C. Chaikin, A. [Editores]. *The New Solar System* (pp 221–240). Sky Publishing Corporation & Cambridge University Press, Cambridge.
- BURNS, J. A.; HAMILTON, D. A. y SHOWALTER, M. R. (2002). *Los anillos de los planetas*. Investigación y Ciencia, 307 (Abril), 58–67.
- JEFFREY, N. C. y ESPOSITO, L. W. (1987). *Los anillos de Urano*. Investigación y Ciencia, 132 (Septiembre), 28–35.
- MARCHIS, F.; DESCAMPS, P.; HESTROFFER, D. y BERTHIER, J. (2005). *Discovery of the triple asteroidal system 87 Sylvia*. Nature, 436, 822–824.
- MORFILL, G. (1999). *El enigma del anillo de Júpiter*. Investigación y Ciencia (Temas15), 66.
- POLLACK, J. B. y CUZZI, J. N. (1982). *Anillos en el sistema solar*. Investigación y Ciencia, 64 (Enero), 45–58.

## 16. Océanos de metal

- BLOXHAM, J. y GUBBIS, D. (1990). *La evolución del campo magnético terrestre*. Investigación y Ciencia, 161 (Febrero), 18–25.
- GLAZTAMIER, G. A. y OLSON, P. (2005). *La geodinamo*. Investigación y Ciencia, 345 (Junio), 24–33.
- MÜLLER, U. y STIEGLITZ, R. (2002). *La geodinamo en el laboratorio*. Investigación y Ciencia, 308 (Mayo), 24–33.
- PARKER, N. E. (1983). *Campos magnéticos en el cosmos*. Investigación y Ciencia, 85 (Octubre), 28–39.
- ROCHETTE, P. y THOMAS, P. (1998). *¿Tienen un núcleo las lunas de Júpiter?* Mundo Científico, 191, 21–23.
- STEVENSON, D. J. (2002). *Planetary magnetic fields*. Earth and Planetary Science Letters, 6523, 1–11.
- ZUBER, M. T. (2003). *Model for magnetic mystery*. Nature, 421, 119–120.

## 17. Hielo I

- BROWN, M. E. (2004). *The Kuiper Belt*. Physics Today, Abril, 49–54.
- LUU, J. X. y JEWITT, D. C. (1996). *El Cinturón de Kuiper*. Investigación y Ciencia, 238 (Julio), 14–21.
- STEVENSON, D. J. (2004). *Volcanoes on Quaoar?* Nature, 432, 681–682.

## 18. Armonía

- CAZENAVE, A. y MEUR, H. L. (1998). *Las deformaciones de la Tierra*. Mundo Científico, 188, 48–51.
- NEWTON, I. (1687). *Philosophiae naturalis principia matemática*. En Hawking, S. (2002). *On The Shoulders of Giants. The Great Works of Physics and Astronomy*. (Trad. cast. *A Hombros*



*de Gigantes. Las grandes obras de la Física y la Astronomía* (pp 651– 1019). Barcelona: Crítica, 2003).

– NICOLAS, A. (1993). *Les montagnes sous la mer*. (Trad. cast. *Las montañas bajo el mar*. Springer-Verlag, Barcelona, 1995).

#### **19. Hacia la heliosfera**

– JOKIPII, J. R. y McDONALD, F. B. (1995). *Los confines de la Heliosfera*. Investigación y Ciencia, 225 (Junio), 14–20.

– LAWLER, A. (2005). *NASA Probe to Examine Edge of Solar System*. Science, 307, 653.

– MAÍZ, J.; BENÍTEZ, N. y CAÑELLES, M. (2005). *La burbuja local y la Tierra*. Investigación y Ciencia, 343 (Abril), 74–71.

### **IV. SIDEREUS**

#### **20. La roca del Génesis**

– BARUCH, J-O.; CHAPRONT, J. y PINET, P. (2000). *La Luna*. Mundo Científico, 217, 74–77.

– BURLEY, J. y MIDDLEHURST, M. (1966). *Apparent Lunar Activity: Historical Review*. Proceedings of the National Academy of Sciences, Vol. 55 (5), 1007–1011.

– DUCROQ, A. (1989). *Historia Universal de las Exploraciones Vol. VI. Exploración del Sistema Solar*. Espasa-Calpe, Madrid.

– FLAMMARION, C. (1876). *Viaje por el Espacio. Últimos Estudios Astronómicos*. Imprenta de La Reinaxensa, Barcelona.

– HEAD, J. W. y GIFFORD, A. (1979). *Lunar Mare Domes: Classification and modes origin*. The Moon and the Planets 22, 235–258.

– HEAD, J. W. y McCORD, T. B. (1978). *Imbrian–Age Highland Volcanism on the Moon: The Gruithuisen and Mairan Domes*. Science, 199, 1433–1436.

– HEIKEN G. H., VANIMAN, D. T. y FRENCH B. M. (1993). *Lunar Sourcebook. A User's guide to the Moon*. Cambridge University Press, Nueva York.

– ORTIZ, J. L. (2001). *Detección de destellos colisionales*. Investigación y Ciencia, 301 (Octubre), 40–41.

– McGETCHIN, T. R. y HEAD, W. J. (1973). *Lunar Cinder Cones*. Science, 180, 68–71.

#### **21. Un cometa diferente**

– A'HEARN, M. F. et al. (2005). *Deep Impact : Excavating Comet Tempel 1*. Science, 310, 258–264.

– BRANDT, J. C. (1999). Comets. En Beatty, J.; Peterson, C. Chaikin, A. [Editores]. *The New Solar System* (pp 321–337). Sky Publishing Corporation & Cambridge University Press, Cambridge.

– CALDER, N. (1985). *The Comet is coming*. (Trad. cast. *¿Qué Viene el Cometa!* Salvat, Barcelona, 1988).

- GUTIÉRREZ; P. J. y RODRIGO, R. (2003–04). *Los Cometas*. Tribuna de Astronomía y Universo, 53 (Noviembre), 76–83; 54 (Diciembre), 76–82 y 56 (Febrero), 78–85.
- SAGAN, C. y DRUYAN, A. (1984). *Comet*. (Trade. cast. *El Cometa*. Planeta, Barcelona, 1986).
- WEAVER, H. (2004). *Not a Bubble Pile?* Science. 304, 1760–1762.

## 22. Eternamente jóvenes

- BELTON, M. J. S. et al. (1996). *Galileo's First Images of Jupiter and the Galilean Satellites*. Science, 274, 377–388.
- CARR, M. H. et al. (1998). *Evidence for a subsurface ocean on Europa*. Nature, 391, 363–373.
- GREELEY, R. (1999). *Europa*. En Beatty, J.; Peterson, C. Chaikin, A. [Editores]. *The New Solar System*. Capítulo 18 (253–262). Sky Publishing Corporation & Cambridge University Press, Cambridge.
- JOHNSON, T. V. (2000). *La cosecha de la misión Galileo*. Investigación y Ciencia, 283 (Abril), 16–25.
- JOHNSON, T. V. (2004). *A Look at the Galilean Satellites After the Galileo Mission*. Physics Today, Abril, 77–83.
- McCORD, T. B. (1998). *Salts on Europa's Surface Detected by Galileo's Near Infrared Mapping Spectrometer*. Science, 280, 1242–1245.
- McEWEN, A. S. et al. (1998). *High-Temperature Silicate Volcanism on Jupiter's Moon Io*. Science, 281, 87–90.
- PAPPALARDO, R. T.; HEAD, W. J. y GREELEY, R. (1999). *El océano oculto de Europa*. Investigación y Ciencia, 279 (Diciembre), 14–23.
- PEALE, S. J. (1999). *Origin and Evolution of the Natural Satellites*. Annual Review Astrophysics, 37, 533–602.
- PEALE, S. J.; CASSEN, P. y REYNOLDS, R. (1979). *Melting of Io by Tidal Dissipation*. Science, 203, 892.
- RUIZ, J. (2001). *The stability against freezing of an internal liquid–water ocean in Callisto*. Nature, 412, 409–410.
- RUIZ J. y TEJERO, R. (2000). *Heat flows through the ice lithosphere of Europa*. Journal of Geophysical Research, 105, 23283–23289.
- RUIZ, J. y TEJERO, R. (2003). *Heat flow, lenticulae spacing, and possibility of convection in the ice shell of Europa*. Icarus, 162, 362–373.

## 23. En el infierno

- BULLOCK, M. A. y GRINSPOON, D. H. (1999). *Cambio climático global en Venus*. Investigación y Ciencia, 272 (Mayo), 12–19.
- DROSSART, P. Y BEZARD, B. (1994). *La atmósfera profunda de Venus*. Mundo Científico, 148, 683–685.

- LUHMANN, J., POLLACK, J. Y COLIN, L. (1994). *Misión Pioneer a Venus*. Investigación y Ciencia, 213 (Junio), 62–69.
- PHILLIPS, R. J. (1994). *La tectónica de Venus*. Mundo Científico, 145, 314–322.
- PRINN, R. (1985). *Volcanes y nubes de Venus*. Investigación y Ciencia, 104 (Mayo), 18–26.
- SAUNDERS, R. (1999). *Venus*. En Beatty, J.; Peterson, C. Chaikin, A. [Editores]. *The New Solar System* (pp 97–110). Sky Publishing Corporation & Cambridge University Press, Cambridge.

## 24. Mundos desvelados

- ELACHI, C. et al. (2005). *Cassini Radar Views the Surface of Titan*. Science, 308, 970–974.
- GAUTIER, D. y AULIN, F. (1997). *Bajo el velo de Titán*. Mundo Científico, 185, 1018–1023.
- KERR, R. A. (2005). *A Strange Little Saturnine Ice Ball Gets Stranger Still*. Science, 307, 1387.
- KOHLHASE, C. (2004). *Return to Saturn's realm*. Planetary Report, (Marzo/Abril), 12–17.
- LORENZ, R. D. (1993). *The Surface of Titan in the Context of ESA's Huygens Probe*. ESA Journal, 17, 275–292.
- LUNINE, J. (2004). *Cassini–Huygens en Saturno*. Investigación y Ciencia, 336 (Septiembre), 42–49.
- PORCO, C. et al. (2005). *Cassini Imaging Science: Initial Results on Phoebe and Iapetus*. Science, 307, 1237–1242.
- PORCO, C. et al. (2005). *Imaging of Titan from the Cassini spacecraft*. Nature, 434, 159–168.
- POZIO, E. (1996). *The volcanic and Tectonic History of Enceladus*. Icarus, 119, 385–404.

## 25. Todo lo exótico

- CRUISHANK, D. (1999). *Triton, Pluto and Charon*. En Beatty, J.; Peterson, C. Chaikin, A. [Editores]. *The New Solar System* (pp 285–296). Sky Publishing Corporation & Cambridge University Press, Cambridge.
- GREENBERG, R. et al. (1991). *Miranda*. En Bergstrahl, J.; Miner, E. y Shapley, M. [Editores] *Uranus*. The University of Arizona Press, Tucson.
- KINOSHITA, J. (1990). *Neptuno*. Investigación y Ciencia, 160, 52–61.
- RUIZ, J. (2003). *Heat flow and depth to a possible internal ocean on Triton*. Icarus, 166, 436–439.

# V. EPÍTOME

## 26. Evolución

- ANGUITA, F. (1988) *Origen e Historia de la Tierra*. Rueda, Madrid.
- COURTY, J.-M. y KIERLIK, E. (2003). *Fuerzas de marea*. Investigación y Ciencia, 316 (Enero), 82–83.

- HEAD, J. (1999). *Surfaces and Interiors of the Terrestrial Planets*. En Beatty, J.; Peterson, C. Chaikin, A. [Editores]. *The New Solar System* (pp 157–174). Sky Publishing Corporation & Cambridge University Press, Cambridge.
- TAYLOR, G. J. (1994). *El legado científico del proyecto Apolo*. Investigación y Ciencia, 216 (Septiembre), 12–19.
- TAYLOR, S. R. y McLENNAN, S. M. (1996). *Evolución de la corteza continental*. Investigación y Ciencia, 234, (Marzo) 56–61.

## 27. Geodiversidad

- GOULD, S. J. (1991). *Bully for Brontosaurus. Reflections in Natural History*. (Trad. cast. *Brontosaurus y la nalga del ministro*. Crítica, Barcelona, 2005).
- LÓPEZ-LLAMAS, C. (2003). *El futuro de las Ciencias Planetarias en el sistema educativo*. Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, 11 (3), 181–186.
- MONOD, J. (1970). *Le hasard et la nécessité* (Trad. cast. *El azar y la necesidad*. Orbis, Barcelona, 1986)
- SALOMONE, M. (2004). *Cuatro horas en Titán*. El País Semanal, 1.482. Domingo 20 de febrero, 62–67.
- SEAGER, S. (2003). *The search for extrasolar Earth-like planets*. Earth and Planetary Science Letters, 6538, 1–12.

## 28. Taxonomía imperfecta

- BINZEL, R. (1990). *Plutón*. Investigación y Ciencia, 167 (Agosto), 20–28.
- CANUP, R. M. (2005). *A Giant Impact Origin of Pluto–Charon*. Science, 307, 546–548.
- CASOLI, F. (1995). *Quirón: ¿asteroide, cometa o planeta?* Mundo Científico, 158, 582–583.
- DE BERGH, C. Y SCHIMMITT, B. (1994). *Plutón, sus hielos, su atmósfera*. Mundo Científico, 147, 572–573.
- KALAS, P (1999). *La planetología sorprende a los astrónomos*. Mundo Científico, 197, 81–83.
- KIDGER, M. (1998). *Plutón en tela de juicio*. Universo, 41, 70–72.
- GRILLOT, T. Y CHABRIER, G. (1996). *La sorprendente diversidad de los planetas gigantes*. Mundo Científico, 173, 933–936.
- HURLEY, J. R. Y SHARA, M. M. (2003). *Planetas libres y cúmulos globulares*. Investigación y Ciencia, 320 (Mayo), 76–83.
- LISSAUER, J. (2003). *Buscar planetas como la Tierra*. Mundo Científico, 242, 38–45.
- SCHNEIDER, J. (1999). *Por fin, otro Sistema Solar*. Mundo Científico, 204. 16–17.

## 29. Todos los planetas

- CASTILLA, G. y DE PABLO, M. A. (2003). *De puntos en el cielo a paisajes exóticos: El origen de las ciencias planetarias*. Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, 11 (3), 163–169.

- GLADMAN, B. (1998). *Twenty-eight ways to build a solar system*. Nature, 396, 513–514.
- GUILLOT, T. (2004). *Probing the Giant Planets*. Physics Today, Abril, 63–69.
- STEVENSON, D. J. (2004). *Planetary Diversity*. Physics Today, Abril, 43–48.
- MALHOTRA, R. (1999). *Migración planetaria*. Investigación y Ciencia, 278 (Noviembre), 4–12.
- MORBIDELLI, A. (2004). *How Neptune Pushed the Boundaries of Our Solar System*. Science, 306, 1302–1304.
- SANTOS, N.; BENZ, W. y MAYOR, M. (2005). *Extrasolar Planets: Constraints for Planet Formation Models*. Science, 310, 251–255.

## VI. EPÍLOGO

### 30. Apología de la exploración

- BEARDSLEY, T. (1996). *Ciencia en el firmamento*. Investigación y Ciencia, 239 (Agosto), 70–77.
- FERNÁNDEZ-RAÑADA, A. (1995). *Los muchos rostros de la Ciencia*. Nobel, Oviedo.
- GARVER, L. et al. (2004). *Evaluating the new space policy*. George C. Marshall Institute, Washington, D.C.
- JASTROW, R. (1989). *Journey to the Stars. Space Exploration. Tomorrow and Beyond*. (Trad. cast. *La Exploración del Espacio*. RBA, Barcelona, 1993).
- LEBEAU, L. (1997). *La estación espacial es un error*. Mundo Científico, 182, 777–779.
- RUIZ DE GOPEGUI, L. (1999). *Objetivos de la investigación espacial*. Mundo Científico, 202, 79–83.
- SAGAN, C. (1980). *Cosmos*. (Trad. cast. *Cosmos*. Planeta, Barcelona, 1997).
- SAGAN, C. (1994). *Pale blue dot*. (Trad. cast. *Un punto azul pálido*. Planeta, Barcelona, 1995).
- STEVENSON, D. J. (2000). *Planetary Science: A Space Odyssey*. Science, 287, 997–1005.
- WAGENSBERG, J. (2002). *Si la naturaleza es la respuesta, ¿cuál era la pregunta?* Tusquets, Barcelona.



